

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**

**NEILE CRISTINA ANDRAOS**

**ENSAIO DE CARREGAMENTO DINÂMICO EM ESTACAS MOLDADAS *IN*  
*LOCO*: CONTRIBUIÇÕES PARA A SELEÇÃO DO SISTEMA DE IMPACTO  
E AMORTECIMENTO A PARTIR DE RETRO-ANÁLISE**

**CURITIBA  
2009**

**NEILE CRISTINA ANDRAOS**

**ENSAIO DE CARREGAMENTO DINÂMICO EM ESTACAS MOLDADAS *IN*  
*LOCO*: CONTRIBUIÇÕES PARA A SELEÇÃO DO SISTEMA DE IMPACTO  
E AMORTECIMENTO A PARTIR DE RETRO-ANÁLISE**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós Graduação em Construção Civil, Área de Concentração em Geotecnia, Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro C. M. Kormann

**CURITIBA  
2009**


## TERMO DE APROVAÇÃO

NEILE CRISTINA ANDRAOS

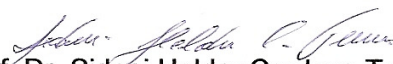
### ENSAIO DE CARREGAMENTO DINÂMICO EM ESTACAS MOLDADAS *IN LOCO*: CONTRIBUIÇÕES PARA A SELEÇÃO DO SISTEMA DE IMPACTO E AMORTECIMENTO A PARTIR DE RETRO-ANÁLISE

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

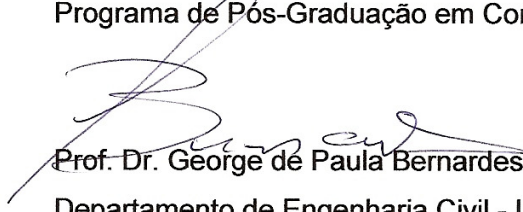
Orientador:



Prof. Dr. Alessandro Christopher Morales Kormann  
Programa de Pós-Graduação em Construção Civil - UFPR



Prof. Dr. Sidnei Helder Cardoso Teixeira  
Programa de Pós-Graduação em Construção Civil - UFPR



Prof. Dr. George de Paula Bernardes  
Departamento de Engenharia Civil - UNESP - Guaratinguetá - SP

Curitiba, 23 de abril de 2009

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais Habib e Senira.

Às minhas irmãs Habinira e Cilene.

À Ana Júlia, Ana Clara e Andressa.

Ao meu namorado Maycon.

Aos meus familiares e amigos.

Por todo amor, compreensão, dedicação, admiração e inspiração.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao grupo de Geotecnia da Universidade Federal do Paraná pela transmissão de conhecimento, amizade e apoio.

Em especial, ao professor Alessandro Christopher Morales Kormann, pela orientação, incentivo, confiança e oportunidade para desenvolver esta dissertação.

Aos colegas de pós-graduação Pablo, Bianca, Charles e Luiz, pela amizade, companheirismo e colaboração durante o curso. E aos demais colegas que acompanharam a realização deste trabalho.

Às bolsistas de Iniciação Científica Talita e Gabriella pelo auxílio na realização deste.

À empresa Fugro In Situ Geotecnia pela cessão dos dados utilizados nesta dissertação.

Aos meus pais pelo apoio, incentivo e dedicação.

Aos meus familiares e amigos pelo estímulo.

Sobretudo a Deus, pela vida, dons, bênçãos, dificuldades e desafios encontrados no caminho, que só fizeram de mim uma pessoa cada vez mais fortalecida na fé.

“A Engenharia de Fundações é uma arte, que se aprimora pela experiência, com o comportamento das fundações devidamente observado e interpretado, e isto não se faz sem atentar para as peculiaridades dos solos.”

Carlos de Souza Pinto

## RESUMO

O Ensaio de Carregamento Dinâmico (ECD) trata-se de uma ferramenta para o controle de qualidade de fundações profundas. O ensaio, desenvolvido para o controle da cravação de estacas pré-moldadas, vem sendo mundialmente utilizado em estacas moldadas *in loco*. Em campo, através de instrumentação, são registrados os sinais de força e velocidade da onda de tensão provocada pelo impacto de um martelo. O analisador de cravação PDA<sup>®</sup> e os métodos CASE<sup>®</sup> e CAPWAP<sup>®</sup> são utilizados para o registro e processamento dos sinais. Os principais resultados do ensaio constam da verificação da capacidade de carga e da integridade estrutural.

No caso da aplicação do ensaio em estacas moldadas *in loco* o sistema de impacto e amortecimento deve ser apropriadamente selecionado a fim de causar o deslocamento necessário para a mobilização da resistência do solo e assegurar que as tensões dinâmicas não danifiquem a integridade estrutural do elemento.

Este trabalho apresenta os resultados obtidos para simulações de diversas combinações do sistema de impacto e amortecimento, através da equação da onda, pelo programa GRLWEAP<sup>™</sup>. Três estacas foram assumidas para esta finalidade. Critérios para a seleção do sistema de impacto e amortecimento foram propostos para as estacas modelo e em seguida comparados e aplicados ao banco de dados.

A fim de tornar as análises condizentes com a realidade, as estacas pertencentes ao banco de dados foram retro-analisadas. Os parâmetros do modelo proposto por Smith (1960) foram definidos através do ajuste dos sinais medidos em campo e aplicados às estacas modelo.

Os resultados das simulações sugerem a seleção de um peso do martelo de 1,5 a 3,0 % da resistência última da estaca, ou, variando de 1,0 a 3,0 % de acordo com a magnitude da resistência. Um valor intermediário de rigidez do amortecimento da ordem de 500 kN/mm faz-se necessário a fim de reduzir as tensões provocadas pelo impacto do martelo. A altura de queda para o último golpe do ensaio pode ser esperada como sendo de duas a cinco vezes o diâmetro da estaca.

Palavras-chave: Ensaio de carregamento dinâmico. Estacas moldadas *in loco*. Sistema de impacto e amortecimento.

## **ABSTRACT**

The High-Strain Dynamic Load Test (DLT) is a quality control tool for deep foundations. Developed for driven piles, testing for evaluating drilled and cast-in-place foundations shafts has become routine procedure in many parts of the world. Through instrumentation field testing is performed by measuring strain and acceleration records under impact of a falling mass. The Pile Driving Analyzer<sup>®</sup> (PDA), CASE<sup>®</sup> and CAPWAP<sup>®</sup> methods are used for data acquisition and analysis. The main testing results are information about bearing capacity and structural integrity.

For testing of cast-in-place piles the hammer-cushion system must be appropriately chosen so that hammer impact causes sufficient pile movement to mobilize the required soil resistance and to assure that dynamic stresses will not damage its structural integrity.

This dissertation presents results of a Wave Equation study performed to evaluate a range of hammer-cushion systems, by GRLWEAP<sup>™</sup>. Three shafts were assumed for this purpose. For them a selection of a hammer was proposed then compared and applied for the database.

The piles belong to the database was back-analyzed with Wave Equation. The parameters required in the Smith model (1960) were defined from the signals adjustment and then applied to the model piles. From that the analysis could be more realistic.

Analysis results suggest that the hammer weight can be between 1,5 and 3,0% of the ultimate resistance or variable among 1,0 and 3,0 % according to the resistance magnitude. The cushion stiffness should be an intermediated value about 500 kN/mm to reduce the dynamic stresses. And the drop height for the last stroke could be expected like two until five times the diameter.

Key words: High-strain dynamic load testing. Cast-in-place piles. Hammer-cushion system.

## SUMÁRIO

### NOTAÇÃO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	12
1.1 ASPECTOS GERAIS	12
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	15
1.2.1 Objetivo Geral	15
1.2.2 Objetivos Específicos	15
1.3 JUSTIFICATIVAS DA PESQUISA	16
1.3.1 Ambiental	16
1.3.2 Econômica	17
1.3.3 Social	17
1.3.4 Tecnológica	18
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	21
2.1 OBRAS DE FUNDAÇÕES	21
2.1.1 Características do Subsolo	21
2.1.2 Alternativas de Fundação	22
2.1.3 Ações e Segurança nas Estruturas de Fundação Profunda	24
2.1.4 Capacidade de Carga	26
2.1.5 O Conceito de Ruptura	27
2.2 MÉTODOS DE CONTROLE DE CAMPO	28
2.2.1 Prova de Carga Estática	30
2.2.2 Controle pela Nega e Repique	33
2.2.2.1 Registro de Nega e Repique	33
2.2.2.2 Fórmulas Dinâmicas	36
2.2.3 Tomografia de Estacas	37
2.2.4 Ensaio de Integridade	41
2.3 ENSAIO DE CARREGAMENTO DINÂMICO	45
2.3.1 Teoria da Equação da Onda Aplicada às Estacas	46



2.3.1.1 Propagação de Ondas.....	49
2.3.1.2 O Modelo de Smith (1960) e a Equação da Onda.....	53
2.3.1.2.1 Parâmetros do Modelo.....	56
2.3.1.2.2 Sistema de Impacto e Amortecimento.....	57
2.3.1.2.3 Modelo do Solo.....	60
2.3.2 Monitoração Dinâmica.....	62
2.3.2.1 Instrumentação: Aquisição de Dados.....	63
2.3.2.2 Registro e Processamento.....	64
2.3.2.3 Análise e Interpretação.....	66
2.3.3 Fatores que Influenciam as Análises.....	70
2.3.4 Aplicação em Estacas Moldadas <i>in Loco</i> .....	72
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>73</b>
3.1 BANCO DE DADOS.....	74
3.2 SIMULAÇÕES COM A EQUAÇÃO DA ONDA.....	75
3.2.1 Especificações do Modelo.....	77
3.2.2 Dados do Martelo.....	77
3.2.3 Dados do Amortecimento.....	78
3.2.4 Dados da Estaca.....	78
3.2.5 Dados do Solo.....	79
3.2.6 Resultados das Análises.....	79
<b>4 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DAS SIMULAÇÕES.....</b>	<b>80</b>
4.1 RETRO-ANÁLISE DOS PARÂMETROS DO MODELO.....	80
4.2 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS.....	88
4.3 DEFINIÇÃO DE CRITÉRIOS PARA ESTACAS MODELO.....	98
4.4 COMPARAÇÃO COM O BANCO DE DADOS.....	103
4.5 APLICAÇÃO AO BANCO DE DADOS E VALIDAÇÃO DOS CRITÉRIOS.....	110
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>125</b>
5.1 CONCLUSÕES.....	125
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	127

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>129</b>
APÊNDICES.....	135
ANEXO.....	219

## NOTAÇÃO

a - aceleração da partícula  
A - área da seção transversal da estaca  
Ac - área da seção transversal do cepo  
c - velocidade de propagação de onda  
C2 - deformação elástica da estaca  
C3 - deformação elástica do solo  
CSX - tensão máxima de compressão  
D - diâmetro da estaca  
DMX - deslocamento máximo  
e - coeficiente de restituição do cepo (COR)  
E - módulo de elasticidade  
Ec - módulo de elasticidade do cepo  
EMX - máxima energia transmitida  
Ep - energia potencial  
F - força  
FMX - força de compressão máxima  
g - aceleração da gravidade  
H - altura de queda do martelo  
J - *damping* de Smith  
Jc - *damping* do método CASE  
K - repique  
k - rigidez do amortecimento  
L - comprimento da estaca  
Lp - comprimento embutido da estaca  
m - massa da estaca  
Q - *quake* ou deformação elástica do solo  
Qd - resistência dinâmica  
R - resistência oferecida pelo solo à penetração  
Rd - resistência dinâmica  
Rl - resistência lateral  
RMX - resistência máxima mobilizada

$R_p$  - resistência de ponta

$R_s$  - resistência estática

$R_u$  - resistência última

$s$  - nega

$t$  - espessura do cepo

$T$  - tempo

$TSX$  - máxima tensão de tração

$u$  - deslocamento de partícula

$V$  - velocidade da partícula

$v_{ri}$  - velocidade de impacto do martelo

$W$  - peso do martelo

$W_p$  - peso próprio da estaca

$x$  - distância

$Z$  - impedância

$\alpha$  - relação entre o peso do martelo e o peso da estaca

$\varepsilon$  - deformação

$\eta$  - eficiência do martelo

$\rho$  - densidade de massa

$\sigma$  - tensão

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 ASPECTOS GERAIS

O crescente interesse pelo controle de qualidade de fundações tem levado um número apreciável de países à implantação de normas e critérios específicos para a realização de ensaios de campo visando à garantia da qualidade.

Mas, como garantir a qualidade de um sistema que envolve a complexa relação entre o solo, um material natural repleto de peculiaridades, e a estrutura, de maneira rápida, econômica e eficaz?

No Brasil, o interesse pela qualidade de fundações foi impulsionado pela criação do Código de Defesa do Consumidor, em 1991, pela publicação da série de normas ABNT NBR ISO 9000, publicada inicialmente em 1987, e pelo seguro de risco de engenharia.

Wolle e Hachich (1998) citam que os conceitos da qualidade aplicados às fundações englobam o ponto de vista gerencial, no qual se encaixam os recursos humanos, a formalização dos procedimentos e a aplicação da ISO 9000 nas empresas, e técnico, que pode ser encarado sob três aspectos básicos: qualidade do projeto, da execução e da fundação acabada.

Segundo Alonso (1991), uma boa fundação é aquela que possui as fases de projeto, controle e execução. O projeto e a execução de fundações são atividades dinâmicas e o controle de qualidade trata-se de um constante registro e troca de informações entre as equipes de campo e de projeto.

De acordo com o autor, as fundações devem ser projetadas e executadas a fim de garantir as condições mínimas de segurança, funcionalidade e durabilidade, sob a ação das cargas em serviço. Para isso, o controle deve ser exercido em três frentes: controle dos materiais, da capacidade de carga e dos recalques. Garantidas essas três frentes é possível conhecer o grau de confiabilidade dos serviços executados e emitir documentos técnicos de garantia da qualidade da fundação.

O controle de campo da capacidade de carga pode ser realizado através de provas de carga estáticas, controle pela nega, controle pelo repique e o controle por instrumentação dinâmica. Com relação ao controle dos materiais, que reflete a

integridade do elemento, podem-se citar os ensaios de integridade e tomografia de estacas.

Nesse contexto, o monitoramento e o controle de fundações profundas através do uso de um adequado sistema de instrumentação, aquisição e interpretação de dados, desempenham um papel fundamental na avaliação do comportamento destas estruturas, notavelmente durante a fase de execução.

O Ensaio de Carregamento Dinâmico (ECD), baseado na análise de cravação de estacas através de instrumentação e fundamentado na teoria da equação da onda (Smith, 1960), objetiva determinar a capacidade de carga da interação estaca-solo. Fornece informações a respeito da integridade da estaca, do deslocamento máximo e das tensões máximas de compressão e de tração durante o golpe, dentre outros subsídios.

Em uma visão holística do ensaio diversos métodos de cálculo e procedimentos computacionais estão envolvidos. O ensaio é baseado na aquisição de sinais, através de instrumentação, de força e velocidade da onda provocada por um impacto, com auxílio de uma unidade específica. No Brasil, o equipamento mais difundido é o PDA<sup>®</sup> <sup>1</sup>. Este equipamento realiza uma série de cálculos, inclusive a estimativa da capacidade de carga, através do Método CASE<sup>®</sup> <sup>2</sup>, que consiste em uma solução matemática fechada. O método é baseado em hipóteses simplificadoras, tais como a homogeneidade e uniformidade da estaca, e deve ser confirmado posteriormente por uma análise numérica, tal como o processo iterativo de ajuste de parâmetros do modelo, realizado através de um programa do tipo CAPWAP<sup>®</sup> <sup>3</sup>.

Por compreender uma gama de fatores que devem ser avaliados durante a fase de controle, por permitir a verificação da capacidade de carga em menor tempo e com menor custo, quando comparado a provas de carga estáticas (Seitz, 1984), e, por seus resultados serem confirmados através de outros ensaios de mesma finalidade (Gravare *et al.*, 1980; Likins *et al.*, 1996; Rausche *et al.*, 1988), trata-se do ensaio de campo mais difundido para o controle de fundações profundas.

Vários países utilizam ensaios dinâmicos. Dentre eles pode-se citar o Brasil, Canadá, Alemanha, Itália, China, Israel e Egito (Niyama, 2002). Alguns possuem

---

<sup>1</sup> PDA<sup>®</sup> - Pile Driving Analyzer (Goble *et al.*, 1980)

<sup>2</sup> CASE<sup>®</sup> - Case Western Reserve Institute (Goble *et al.*, 1980)

<sup>3</sup> CAPWAP<sup>®</sup> - Case Pile Wave Analysis Program (Goble *et al.*, 1980)

normas específicas para o ensaio, como a Austrália, China e Estados Unidos (Gonçalves *et al.*, 1996).

No Brasil<sup>4</sup>, a utilização do ensaio de carregamento dinâmico iniciou-se no ano de 1981, durante a cravação de uma estaca de aço, em obra de plataforma marítima (Niyama *et al.*, 1982a). Em obras situadas em terra, o ensaio começou a ser empregado a partir de 1983. E desde então, a técnica passou a ser utilizada com maior frequência.

Em outubro de 1994, foi publicada a ABNT NBR 13208, prescrevendo o método de ensaio de carregamento dinâmico em estacas, com análises fundamentadas na teoria da equação da onda. Atualmente, encontra-se em vigor a versão revisada da norma, publicada em julho de 2007.

O ensaio de carregamento dinâmico foi desenvolvido para estacas pré-moldadas inseridas no terreno através de um sistema de cravação a diesel ou a ar comprimido. No entanto, segundo Likins e Hussein (1995), é comum a sua utilização em estacas moldadas *in loco* no mundo todo.

A execução deste tipo de estacas vem ganhando campo no Brasil. Dentre outros motivos, pelas vantagens em reduzir os impactos ambientais causados pela cravação, tais como vibrações e ruídos (Wolle e Hachich, 1998).

A ABNT NBR 13208:2007 prescreve a aplicação do ensaio em estacas moldadas *in loco* e o uso de martelos de queda livre. A necessidade da adaptação do ensaio ao panorama brasileiro é evidente.

No caso de estacas cravadas um sistema de cravação definido em projeto encontra-se disponível e pode ser utilizado na realização dos ensaios. Já para estacas moldadas *in loco* há a necessidade da seleção de um sistema de impacto.

Para que a utilização do ensaio neste tipo de estacas seja aperfeiçoada, há a necessidade de se realizar uma série de estudos, os quais podem envolver dados de ensaios previamente realizados.

Nesse âmbito, o presente trabalho pretende colaborar com o desenvolvimento de critérios para a execução de ensaios de carregamento dinâmico em estacas moldadas *in loco*.

---

<sup>4</sup> Maiores informações a respeito do histórico do ensaio no Brasil podem ser encontradas nos trabalhos publicados por Gonçalves *et al.* (1996), Gonçalves, *et al.* (2000) e Niyama (2002).

## 1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

### 1.2.1 Objetivo Geral

No presente trabalho, pretende-se fornecer subsídios para a seleção do sistema de impacto e amortecimento na aplicação do ensaio de carregamento dinâmico em estacas moldadas *in loco* a partir de valores previstos para a mobilização da resistência última.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos estão relacionados às etapas de evolução da pesquisa, visando o objetivo geral acima descrito. São eles:

- Análise dos dados e dos resultados de ensaios, disponíveis em relatórios de ECD, com o objetivo de avaliar as características das estacas e dos ensaios realizados;
- Organização e montagem de um banco de dados a partir dos resultados das análises CAPWAP® realizadas para o golpe de mobilização da maior resistência, a fim de permitir a identificação de informações a serem utilizadas nas demais etapas;
- Retro-análise dos parâmetros do modelo utilizado através do ajuste dos sinais medido em campo e simulado, com o objetivo de verificar as faixas representativas para as estacas pertencentes ao banco de dados;
- Avaliação da influência dos parâmetros do modelo para diversas combinações das características do sistema de impacto e amortecimento, sobre estacas assumidas, com a finalidade de definir intervalos para o peso do martelo, alturas de queda e rigidez do amortecimento;
- Formulação e validação de critérios para a seleção do sistema de impacto e amortecimento para as estacas modelo;



- Comparação com o banco de dados, a fim de se observar as relações pertinentes aos ensaios realizados;
- Aplicação e validação dos critérios propostos para as estacas pertencentes ao banco de dados.

Cada objetivo específico corresponde a uma fase de desenvolvimento da pesquisa contendo suas próprias metodologias e resultados. Estes, por sua vez, se constituem em informações que serão utilizadas nas etapas subseqüentes.

### 1.3 JUSTIFICATIVAS DA PESQUISA

#### 1.3.1 Ambiental

Wolle e Hachich (1998) apresentam algumas influências sobre o projeto e a execução de fundações devido à implantação das normas ISO da série 14000. Segundo os autores a cravação de estacas sofrerá restrições e possivelmente será excluída de regiões densamente habitadas.

A cravação de estacas provoca vibrações no terreno e ruídos sonoros. Gera resíduo na construção civil e desperdício de materiais e matérias-prima, visto que as profundidades de embutimento de projeto muitas vezes podem não ser alcançadas.

Esses inconvenientes tendem a ser contornados com a utilização de estacas moldadas no local, o que contribui para sua maior utilização.

Uma ferramenta de controle de qualidade tal como o ensaio de carregamento dinâmico que, além de permitir uma verificação da capacidade de carga da estaca, fornece informações a respeito da integridade, com menor custo e maior rapidez, torna-se atrativa para este tipo de fundação.

Esse objetivo será alcançado mediante o estudo de ensaios já realizados. Além disso, o sucesso da realização do ensaio em estacas moldadas no local depende da seleção do sistema de impacto e amortecimento.

### 1.3.2 Econômica

De acordo com a ABNT NBR 6122:1996, para que a capacidade de carga das fundações de uma obra seja verificada, podem ser realizadas provas de carga estáticas (ABNT NBR 12131) ou ensaios de carregamento dinâmico (ABNT NBR 13208), em quantidade representativa de estacas.

De acordo com o Eurocódigo 7 (1999), os resultados dos ensaios de carregamento dinâmico podem ser utilizados no dimensionamento desde que tenha sido realizado um programa adequado de caracterização do terreno.

Segundo a norma brasileira, quando da realização destes ensaios em etapa preliminar, o coeficiente de segurança pode ser reduzido de 2,0 para 1,6.

Em geral, os métodos teóricos para a previsão da capacidade de carga, são conservadores. E esta redução do coeficiente de segurança resulta na economia dos materiais.

Além disso, a realização de um ensaio de carregamento dinâmico tem menor custo quando comparada a uma prova de carga estática. O tempo de realização do ensaio também é menor (Seitz, 1984). Isso permite que o ensaio seja realizado em maior número de estacas.

Diversos estudos mostram que com a execução do ensaio de carregamento dinâmico, cujos resultados sejam satisfatórios, é possível obter economia na execução de fundações (Gonçalves *et al.*, 1996).

Ainda, sabe-se que se gasta mais na remediação do que na prevenção de incidentes. Inevitavelmente o custo da correção de uma deficiência ou reabilitação de uma estrutura, cuja funcionalidade e segurança tenha sido prejudicada por uma ruptura de fundação ou por deformações excessivas, será maior do que o custo da realização prévia de ensaios para a verificação da qualidade.

### 1.3.3 Social

O baixo custo dos ensaios dinâmicos e seu reduzido prazo de execução quando comparados ao das provas de carga estática resultou num aumento

significativo de uso, constituindo-se em ferramenta valiosa no processo de verificação de qualidade de fundações profundas (Milititsky *et al.*, 2005).

Segundo Milititsky *et al.* (2005), com a execução destes ensaios e conseqüente verificação da qualidade das fundações, a ocorrência de acidentes e de patologias nas estruturas relacionados às fundações diminuirá.

O ramo de riscos de engenharia reúne os seguros que se aplicam aos trabalhos de engenharia. Os seguros de riscos de engenharia, de interesse de grandes empreendedores e de classes desfavorecidas, garantem a reposição dos bens que tenham sofrido danos materiais.

Sinistros, para as empresas de seguro, são eventos súbitos e imprevistos que resultam em danos e prejuízos. Ocorrem de forma repentina e são decorrentes de causas diversas, inclusive de patologias ignoradas ou tratadas de forma inadequada. A patologia é uma manifestação que, não corrigida, agrava-se e pode transformar-se em sinistro (Marcelli, 2008).

Em obras públicas, o controle da qualidade pode garantir o bom uso dos recursos, visando economia e segurança dos empreendimentos.

Com a expansão do setor imobiliário e o crescente interesse por moradias para as classes de média e baixa renda, o controle de qualidade por um método rápido, econômico e eficiente torna-se indispensável.

No programa QUALIHAB (Programa da Qualidade da Construção Habitacional do Estado de São Paulo), por exemplo, o ensaio é adotado como referência para o controle de qualidade em estacas. O programa visa garantir a qualidade das habitações construídas pelo Estado. Um manual de especificações pode ser encontrado em Gonçalves *et al.* (2000).

#### 1.3.4 Tecnológica

O ensaio de carregamento dinâmico foi desenvolvido para estacas pré-fabricadas cravadas e necessita de estudos aprofundados para que tenha sua utilização consagrada em estacas moldadas *in loco* (Gonçalves *et al.*, 2000).

Em estacas cravadas, pode-se realizar o ensaio durante a cravação da mesma e/ou em uma re-cravação, após um período de repouso. Nesse caso, um

sistema de cravação definido em projeto encontra-se disponível e pode ser utilizado na realização dos ensaios.

Já para estacas moldadas *in loco*, nas quais o ensaio deve ser realizado a partir de sete dias após a concretagem (ABNT NBR 13208, 2007), há a necessidade da seleção de um sistema de cravação.

Uma série de pesquisas a respeito da aplicação do ensaio de carregamento dinâmico às estacas moldadas *in loco* vem sendo realizadas nos últimos anos (Seitz, 1984; Seidel e Rausche, 1984; Likins e Hussein, 1995; Liu *et al.*, 1996; Navajas e Niyama, 1996; Kormann *et al.*, 2000; Kormann *et al.*, 2003). Em geral, o sucesso do ensaio depende da seleção adequada do martelo e do sistema de amortecimento a serem utilizados.

Além disso, segundo Seitz (1984), devido à economia do ensaio, pode ser utilizado em maior número e frequência, o que possibilita a obtenção de um maior universo amostral. Por sua vez, a maior quantidade de amostras proverá o desenvolvimento de técnicas e utilização do ensaio, bem como, avanços no entendimento do comportamento dinâmico de fundações.

#### 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta ao leitor uma introdução ao ensaio de carregamento dinâmico, bem como o escopo deste trabalho. Proporciona uma visão ampla da dissertação, através da descrição do problema, dos objetivos, das justificativas e da estrutura da dissertação.

O capítulo 2 compreende a revisão bibliográfica. Este capítulo contém todas as informações necessárias para o correto entendimento do experimento. Nele são abordadas as obras de fundações, como são concebidas e quais são as principais ferramentas utilizadas no controle de sua execução. O Ensaio de Carregamento Dinâmico também é apresentado neste capítulo. São abordados os principais conceitos relacionados ao ensaio, tais como a aplicação da teoria da equação da onda às estacas, aquisição, registro e processamento de dados de instrumentação, entre outros.

No capítulo 3 descrevem-se o banco de dados e as principais características dos ensaios de carregamento dinâmico estudados, bem como as metodologias empregadas nas diversas simulações realizadas.

As principais informações das simulações desenvolvidas na pesquisa, bem como seus resultados e interpretações, são expostas no capítulo 4.

As conclusões obtidas através deste estudo e sugestões para trabalhos futuros estão presentes no capítulo 5.

As referências bibliográficas apresentam as principais fontes de informação utilizadas na composição da dissertação.

Nos Apêndices foram disponibilizadas planilhas contendo as principais informações obtidas nas simulações.

O Anexo mostra os resultados de uma análise numérica realizada através do método CAPWAP<sup>®</sup> que se constituiu na principal fonte de dados utilizados neste estudo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 OBRAS DE FUNDAÇÕES

Definir uma obra de fundação é, ao mesmo tempo, uma tarefa fácil e difícil. Fácil, no sentido de que podemos encontrá-la abaixo de qualquer obra de engenharia. Difícil, se pararmos para pensar no complexo sistema que envolve a interação entre o solo e a estrutura através do tempo.

De acordo com Velloso e Lopes (2004), “uma fundação é o casamento, nem sempre harmonioso, da técnica e da arte”. Para Pinto (1998), “a engenharia de fundações é uma arte que se aprimora pela experiência”.

As fundações são sistemas compostos por elementos estruturais e pelo solo, capazes de suportar as cargas advindas da superestrutura. De acordo com a ABNT NBR 6122:1996, são elementos responsáveis pela transferência de um carregamento para o terreno.

Segundo Velloso e Lopes (1998), na escolha da alternativa mais adequada dos elementos que irão compor as fundações, algumas características da obra, notavelmente as do subsolo, podem requerer uma determinada opção. Enquanto outras permitem uma variedade de soluções. Nesses casos a escolha deve se basear no menor custo e prazo de execução.

Para a definição do tipo de fundação é preciso considerar as características do subsolo, do local da obra e das construções vizinhas, bem como, dos esforços atuantes nas fundações (Velloso e Lopes, 1998), como veremos na seqüência.

#### 2.1.1 Características do Subsolo

O projeto de fundações contempla as cargas aplicadas pela obra e a resposta do solo a estas solicitações. Os solos são distintos entre si e respondem de maneira variada. Por esta razão, toda experiência transmitida está relacionada ao tipo de solo.

As características do subsolo são basicamente obtidas através de ensaios. Segundo a ABNT NBR 6122:1996, para fins de projeto e execução de fundações, as investigações do terreno compreendem as investigações de campo e de laboratório.

Segundo Milititsky *et al.* (2005), no Brasil o programa preliminar é normalmente desenvolvido com base nos ensaios SPT. As sondagens de reconhecimento à percussão (SPT), executadas de acordo com a ABNT NBR 6484:2001, são indispensáveis. Fornecem a descrição das camadas atravessadas, os valores dos índices de resistência à penetração e as posições dos níveis de água.

Um programa complementar depende das condições geotécnicas e estruturais do projeto. Os ensaios de campo complementares<sup>5</sup> visam reconhecer o terreno de fundação, avaliar suas características de resistência, deformabilidade e permeabilidade. Destacam-se, entre outros, os ensaios de penetração de cone, ensaios de palheta, ensaios pressiométricos, ensaios dilatométricos, ensaios de permeabilidade e provas de carga.

### 2.1.2 Alternativas de Fundação

As alternativas de execução das fundações, segundo Velloso e Lopes (1998), podem ser divididas em dois grupos: superficiais e profundas.

De acordo com a ABNT NBR 6122:1996, as fundações superficiais (rasas ou diretas), são elementos em que a carga é transmitida ao terreno predominantemente pelas pressões distribuídas sob a base da fundação. Compreendem as alternativas em que a profundidade de assentamento em relação ao terreno adjacente é inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação. São elas: sapatas, blocos, radiers, sapatas associadas, vigas de fundação e sapatas corridas.

A mesma norma conceitua fundações profundas como elementos de fundação que transmitem a carga ao terreno pela base (resistência de ponta), por superfície lateral (resistência de fuste) ou por uma combinação das duas. Neste tipo de fundação incluem-se as estacas, os tubulões e os caixões, os quais são assentes

---

<sup>5</sup> Maiores informações a respeito dos ensaios podem ser encontradas em Schnaid (2000).

em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão em planta, e no mínimo três metros.

As estacas usuais podem ser classificadas em duas categorias: de deslocamento e escavadas (Décourt *et al.*, 1998).

Estacas de deslocamento são aquelas introduzidas no terreno através de um processo que não promova a retirada de solo, como as estacas pré-moldadas de concreto, metálicas, de madeira e tipo Franki.

São denominadas escavadas as estacas executadas *in situ* através da perfuração do terreno e com remoção de material, com ou sem revestimento, com ou sem utilização de fluido estabilizante. Alguns exemplos são: estacas tipo broca, Strauss, barretes e hélices contínuas.

As estacas também podem ser classificadas quanto ao material, tais como de concreto, aço ou madeira; quanto à execução, pré-fabricada ou moldada *in loco*; quanto ao deslocamento, sem deslocamento, com pequeno deslocamento e com grande deslocamento (Velloso e Lopes, 1998). A Figura 1 apresenta uma classificação dos tipos mais comuns de estacas a partir do método executivo.

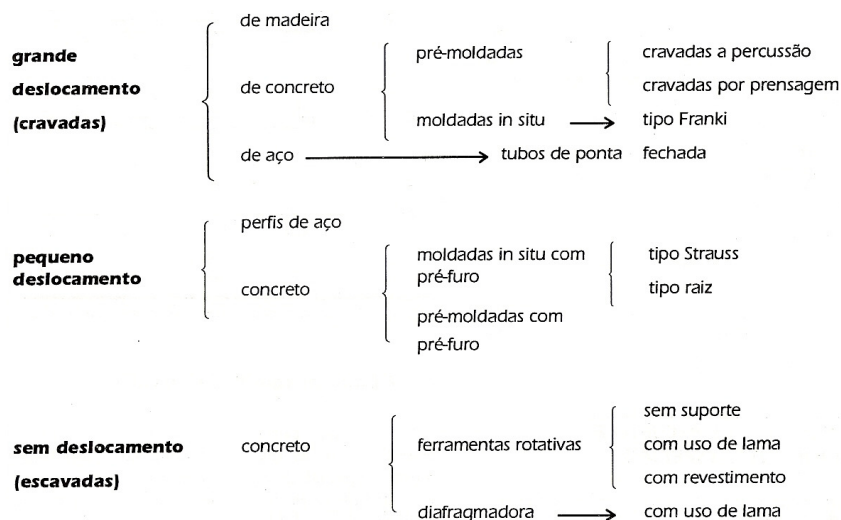


Figura 1 – Classificação dos principais tipos de estacas

Fonte: Velloso e Lopes (1998)

Maiores informações podem ser obtidas em Maia *et al.* (1998), Velloso e Lopes (2002), ABEF (2004), Presa e Pousada (2001).



### 2.1.3 Ações e Segurança nas Estruturas de Fundação Profunda

A definição do tipo de fundação envolve elementos e critérios de projeto, tais como a topografia da área, dados geológicos-geotécnicos, dados da estrutura, dados de construções vizinhas, bem como as ações de solicitação, que podem ser permanentes, variáveis e excepcionais (ABNT NBR 8681, 2003).

Os requisitos básicos a serem atendidos pelo projeto de uma fundação, segundo Velloso e Lopes (1998), são:

- Deformações aceitáveis sob as condições de trabalho;
- Segurança adequada ao colapso do solo;
- Segurança adequada ao colapso dos elementos estruturais.

Outros requisitos podem ser necessários de acordo com o tipo da obra, tais como a verificação da segurança ao tombamento e a vibração.

Segundo a ABNT NBR 6122:1996, de acordo com os carregamentos e as ações de solicitação fornecidas ao projetista de fundações a abordagem a respeito da segurança nas estruturas tomará diferentes rumos: o conceito de segurança relacionado aos coeficientes de segurança globais ou aos coeficientes de segurança parciais.

Caso seja fornecido ao projetista da fundação um único tipo de carregamento sem especificação das ações combinadas, aplica-se o conceito de segurança global.

De acordo com Alonso (1991), "dentro da filosofia do coeficiente de segurança global, situam-se os princípios das tensões admissíveis e das cargas de ruptura".

As cargas admissíveis nos elementos de fundação são obtidas pela aplicação de fatores de segurança sobre os valores da capacidade de carga obtido por cálculo ou experimentalmente (ABNT NBR 6122, 1996).

No caso de fundações rasas, o coeficiente de segurança global mínimo é igual a três. Já para fundações profundas, o fator é igual a dois, podendo ser minorado para 1,6 quando se dispõe do resultado de um número adequado de provas de carga, realizados em etapa preliminar, e, quando os elementos ensaiados são representativos das estacas da obra (ABNT NBR 6122, 1996).

Quanto aos deslocamentos máximos, os valores das cargas admissíveis são obtidos por cálculo ou experimentalmente, com aplicação de fator de segurança mínimo de 1,5 (ABNT NBR 6122, 1996).

Caso seja fornecido ao projetista os valores das ações que compõem cada tipo de carregamento, pode-se fazer uso de fatores de segurança parciais.

Dentro do conceito de coeficientes de segurança parciais a segurança deve ser estudada por meio de duas análises, correspondentes aos estados limites últimos e de utilização (ABNT NBR 6122, 1996).

De acordo com Velloso e Lopes (1998), considera-se o estado limite de utilização o atendimento ao requisito de deformações aceitáveis sob as condições de trabalho. Já, o atendimento da segurança ao colapso do solo e do elemento estrutural, corresponde à verificação do estado limite último.

A ABNT NBR 8681:2003 estabelece critérios para a combinação das ações na verificação dos estados limites de uma estrutura. Os estados limites últimos estão associados ao colapso parcial ou total da obra, enquanto que os estados limites de utilização, ou serviço, estão ligados à ocorrência de deformações, fissuras, etc., que comprometem a uso da obra.

Os valores de cálculo das ações na estrutura no estado limite último são comparados aos valores de cálculo da resistência do solo ou do elemento de fundação (ABNT NBR 6122, 1996). Estes devem ser obtidos conforme as prescrições pertinentes aos materiais constituintes do elemento. Aqueles são determinados dividindo-se os valores característicos dos parâmetros de resistência do solo, coesão e ângulo de atrito, pelos coeficientes de ponderação preconizados pela ABNT NBR 6122:1996.

Segundo a ABNT NBR 6122:1996, o valor de cálculo da resistência de um elemento de fundação, ou seja, a sua capacidade de carga, pode ser determinado de três maneiras: a partir de provas de carga, a partir de método semi-empírico ou empírico, ou, quando se empregam métodos teóricos.

Para cada caso, a norma ABNT NBR 6122:1996 recomenda os devidos coeficientes de ponderação.

Na análise do estado limite de utilização devem ser calculados os deslocamentos da fundação submetida aos valores dos esforços na estrutura. Os deslocamentos devem ser suportados pela estrutura sem sofrerem danos que prejudiquem a utilização (ABNT NBR 6122, 1996).

#### 2.1.4 Capacidade de Carga

Segundo Reese *et al.* (2006), as estacas são empregadas com duas finalidades: aumentar a capacidade de carga do solo e reduzir os recalques da fundação.

Esses objetivos são acompanhados pela transferência do carregamento através de um solo menos resistente para um solo mais resistente, pela distribuição da carga para o solo menos resistente através do atrito ao longo do fuste, ou, pela combinação das duas parcelas (Reese *et al.*, 2006).

Uma estaca submetida a um carregamento vertical irá resistir a essa solicitação parcialmente pela resistência ao cisalhamento gerada ao longo de seu fuste e parcialmente pelas tensões normais geradas ao nível de sua ponta.

Segundo Reese *et al.* (2006), a capacidade de carga é definida como a soma das cargas máximas que podem ser suportadas pelo atrito lateral e pela ponta.

O tipo de solo das camadas atravessadas pelo fuste, o comprimento da estaca e o seu método de instalação são fatores que afetam a transferência de carga para o terreno. Segundo Reese *et al.* (2006), essa transferência de carga é extremamente complexa e de difícil quantificação analítica.

Diversos métodos foram desenvolvidos para a determinação da capacidade de carga de estacas. Alguns deles são fundamentados nos conceitos da mecânica dos solos, tais como o método de Berezantsev *et al.* (1961)<sup>6</sup>, para o cálculo da carga de ponta em areias, e Meyerhof (1951)<sup>6</sup> e Skempton (1951)<sup>6</sup>, para o cálculo da capacidade por atrito lateral. Outros são baseados em ensaios de campo, tais como o SPT e o CPT, ou correlações entre eles.

No Brasil, os dois métodos mais utilizados para o dimensionamento de fundações em estacas são os métodos de Aoki e Velloso (1975) e Décourt e Quaresma (1978)<sup>7</sup>.

No método proposto por Aoki e Velloso (1975), tanto a tensão limite de ruptura de ponta quanto a de atrito lateral são avaliadas em função da tensão de

---

<sup>6</sup> Apud Décourt *et al.* (1998).

<sup>7</sup> Maiores informações a respeito dos métodos podem ser obtidas em Décourt *et al.* (1998).

ponta do ensaio de penetração do cone. Na ausência de ensaios de CPT, resultados de SPT podem ser utilizados a partir de correlação.

Décourt e Quaresma (1978) apresentaram um processo de avaliação da capacidade de carga de estacas com base nos valores de resistência à penetração do ensaio SPT. O método, desenvolvido para estacas de deslocamento, foi objeto de algumas extensões, objetivando a adequação a outros tipos de estacas.

A avaliação da capacidade de carga pode ser realizada durante a execução. Segundo a ABNT NBR 6122 (1996, item 7.2), entende-se por verificação da capacidade de carga a realização de provas de carga estáticas, de acordo com a ABNT NBR 12131:2006, ou a realização de ensaios de carregamento dinâmico, em conformidade com a norma ABNT NBR 13208:2007.

#### 2.1.5 O Conceito de Ruptura

A capacidade de carga contra a ruptura de uma fundação, segundo Alonso (1991), corresponde ao menor dos dois valores:

- Resistência do elemento estrutural da peça que compõe a fundação;
- Resistência do solo adjacente ao elemento estrutural e que lhe dá suporte.

No que diz respeito aos valores de cálculo da resistência do elemento estrutural, devem ser obedecidas, conforme o caso, as prescrições de normas específicas dos materiais constituintes do elemento.

A capacidade dos solos em suportar cargas depende de sua resistência ao cisalhamento. A origem da resistência ao cisalhamento dos solos se dá a partir do atrito mineral-mineral, do entrosamento entre partículas e da coesão. Maiores informações podem ser encontradas em Lambe e Whitman (1969), Das (2007) e Pinto (2006).

Qualquer problema de ruptura envolve uma superfície de ruptura, na qual em todos os seus pontos a tensão de cisalhamento atinge o valor limite da resistência ao cisalhamento. Os ensaios de cisalhamento direto e de compressão triaxial, são costumeiramente empregados para a determinação da resistência ao cisalhamento dos solos em laboratório. A descrição dos ensaios pode ser obtida em Head (1994).

De acordo com Décourt *et al.* (1998), “as verificações experimentais de capacidade de carga apresentam resultados em termos de gráficos carga-recalque, onde a inexistência de condições claras de ruptura se constituem na regra geral”.

De Beer (1988, *apud* Décourt *et al.*, 1998), apresenta os conceitos de ruptura física e convencional. Ruptura física é definida como o limite da relação do acréscimo do recalque da ponta da estaca pelo acréscimo de carga, tendendo ao infinito. Ruptura convencional é definida como sendo a carga correspondente a uma deformação da ponta da estaca de 10 % de seu diâmetro no caso de estacas de deslocamento e escavadas em solo argiloso e de 30 % do diâmetro para estacas escavadas em solos granulares.

Décourt (1996, *apud* Décourt *et al.*, 1998), propôs a definição da ruptura física em termos da rigidez. A rigidez de uma fundação é definida pela relação entre a carga e o recalque produzido pela aplicação da mesma. A ruptura física seria definida pelo valor nulo da rigidez.

Em estacas de deslocamento a diferença entre a ruptura convencional e a ruptura física tende a ser pequena (Décourt *et al.*, 1998). A ruptura física pode vir a ocorrer em provas de carga levadas até deformações da ordem de dezenas de milímetros (Décourt, 1994).

Para estacas escavadas, a ruptura física não ocorre. É raramente alcançada, pois as deformações envolvidas são muito elevadas, da ordem de centenas de milímetros (Décourt, 1994).

Segundo Décourt (1994), na maioria das provas de carga realizadas durante a execução das fundações, a fim de verificar a capacidade de carga das mesmas, a ruptura não é alcançada.

## 2.2 MÉTODOS DE CONTROLE DE CAMPO

Na fase de projeto, seleciona-se o tipo de fundação a empregar, em função das características geotécnicas locais e da obra. Durante a execução, as equipes seguem o método executivo previsto em projeto. Na interface projeto-execução situa-se o controle da qualidade da fundação, que deverá aferir as previsões feitas,

adaptando a execução às mesmas ou fornecendo subsídios ao projeto para reavaliação (Alonso, 1991).

Segundo Alonso (1991), uma boa fundação é constituída pelo tripé: projeto, controle e execução. De acordo com o autor, ela deve ser projetada e executada para garantir, sob ação das cargas em serviço, as condições mínimas de segurança, funcionalidade e durabilidade.

Entende-se por segurança o atendimento aos coeficientes de segurança contra a ruptura, fixados pelas normas técnicas, tanto no que diz respeito às resistências dos elementos estruturais quanto às do solo (Alonso, 1991).

Por funcionalidade, entende-se a garantia dos deslocamentos compatíveis com o tipo e a finalidade a que se destina a estrutura (Alonso, 1991).

As fundações devem apresentar, quanto à durabilidade, uma vida útil no mínimo igual a da estrutura. Um estudo das variações das resistências dos materiais constituintes das fundações, do solo e das cargas atuantes, ao longo do tempo, faz-se necessário.

O bom desempenho de uma fundação está intimamente ligado ao controle e à garantia da qualidade impostos pelas equipes envolvidas com o projeto e a execução da fundação.

De acordo com Alonso (1991), entende-se por garantia da qualidade o “conjunto de ações planejadas e sistemáticas necessárias para prover confiança adequada de que os produtos, processos e serviços satisfarão determinados requisitos de qualidade”. A qualidade é a propriedade que permite avaliar, aprovar, aceitar ou recusar, qualquer serviço ou produto.

Segundo Alonso (1991), o controle durante a execução deve ser exercido em três frentes:

- Controle dos materiais que comporão os elementos estruturais da fundação, visando à resistência, integridade e durabilidade;
- Controle da capacidade de carga do conjunto solo-estrutura, exercido durante a fase de instalação dos elementos estruturais;
- Controle dos recalques, através da observação do comportamento da fundação à medida que vai sendo carregada pela estrutura.

De acordo com o autor, após a verificação destes três itens, é possível conhecer o grau de confiabilidade dos serviços executados, bem como emitir documentos técnicos de garantia da qualidade da fundação.

O controle de campo da capacidade de carga pode ser realizado através de provas de carga estáticas e por métodos dinâmicos, que compreendem o controle pela nega e repique e o ensaio de carregamento dinâmico (Alonso, 1991; Niyama *et al.*, 1998).

De acordo com Kormann (2002), para a avaliação da integridade estrutural de fundações profundas, vem sendo desenvolvidos métodos indiretos e não destrutivos que se baseiam em fundamentos de emissão e recepção de ondas. São exemplos dessas técnicas o Ensaio de Integridade de Estacas e a Tomografia de Estacas.

Na seqüência, os métodos de controle de campo mais utilizados no Brasil serão apresentados. Como o ensaio de carregamento dinâmico é o foco desta pesquisa, maior atenção será dada ao mesmo, e será contemplado no próximo capítulo.

### 2.2.1 Prova de Carga Estática

Uma prova de carga consiste em aplicar esforços estáticos crescentes à estaca e registrar os deslocamentos correspondentes. Os esforços aplicados podem ser axiais, de tração ou de compressão, ou transversais (ABNT NBR 12131, 2006).

O dispositivo de aplicação de carga é constituído por macaco hidráulico alimentado por bombas, atuando contra um sistema de reação (ABNT NBR 12131, 2006).

Diversas montagens para o sistema de reação são possíveis. Geralmente, é constituído de uma viga metálica de reação fixada ao solo por meio de tirantes (Niyama *et al.*, 1998). O esquema usual de montagem pode ser visualizado na Figura 2. Esse sistema deve ser projetado, montado e utilizado de forma que a carga aplicada atue na direção desejada, sem produzir choques ou vibrações.

Na prova de carga são medidas as cargas aplicadas (por meio de células de carga ou de manômetros calibrados), os deslocamentos axiais (ensaio com carregamento axial) ou transversais (ensaios com carregamento transversal) do topo da estaca, e, o tempo da realização de cada medida (ABNT NBR 12131, 2006).

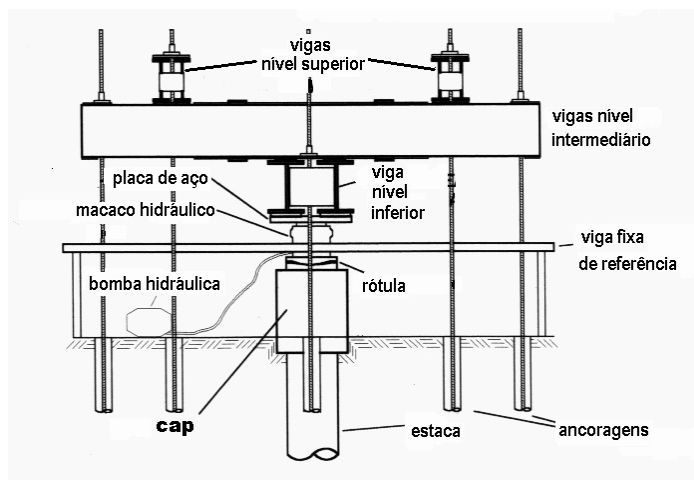


Figura 2 – Esquema de montagem de prova de carga

Fonte: Dyminski (2000)

Os deslocamentos verticais do topo da estaca são medidos simultaneamente através de quatro deflectômetros mecânicos instalados em dois eixos ortogonais. Os deflectômetros ficam apoiados ou fixados em uma viga de referência (ABNT NBR 12131, 2006).

Na execução da prova de carga a estaca é carregada até a carga definida pelo projetista, atendendo aos requisitos de segurança da ABNT NBR 6122:1996.

Os ensaios podem ser do tipo lento; a velocidade de recalque constante; rápido em estágios; em ciclos de carga e descarga; e, cíclicos (Niyama *et al.*, 1998).

Para os ensaios lentos, segundo Niyama *et al.*, (1998), procedimento mais antigo e convencional utilizado no Brasil, o carregamento é executado em estágios iguais e sucessivos.

Em cada estágio, a carga é mantida até a estabilização dos deslocamentos ou, no mínimo, por 30 minutos. Os deslocamentos são lidos imediatamente após a aplicação da carga correspondente, seguindo-se leituras sucessivas até se atingir a estabilização.

A estabilização dos deslocamentos ocorre quando em duas leituras consecutivas o recalque não exceder 5 % do recalque total observado no mesmo estágio de carregamento (ABNT NBR 12131, 2006).

Segundo a ABNT NBR 6122:1996, a capacidade de carga do elemento de prova deve ser considerada definida quando ocorrer ruptura nítida. Porém, o



carregamento da estaca de prova pode não indicar uma carga de ruptura clara. Isto ocorre quando não se pretende levar fundação à ruptura ou a estaca tem capacidade de resistir a uma carga maior do que aquela que se pode aplicar na prova (por limitação de reação), ou quando a estaca é carregada até apresentar um recalque considerável, mas a curva carga-recalque não indica uma carga de ruptura, mas um crescimento contínuo do recalque com a carga.

Nos dois primeiros casos deve-se extrapolar a curva carga-recalque para se avaliar a carga de ruptura. Isso pode ser feito através de critérios consagrados na Mecânica dos Solos sobre uma curva de primeiro carregamento.

Um método muito utilizado no Brasil, segundo Cintra e Aoki (1999), para essa extrapolação é o de Van der Veen (1953). Segundo os autores, o método de Van der Veen é também um critério de ruptura.

No terceiro caso, a carga de ruptura pode ser convencionada como aquela que corresponde, na curva carga x deslocamento, a um dado recalque, calculado conforme as prescrições da ABNT NBR 6122:1996, ou por métodos consagrados.

O descarregamento, sempre que o ensaio não atinge a ruptura, é iniciado após decorridas 12 horas de manutenção da carga máxima aplicada. A ABNT NBR 12131:2006 recomenda que sejam realizados pelo menos quatro estágios de descarregamento.

O prazo mínimo para a realização do ensaio é de aproximadamente 18 horas, prolongando-se muitas vezes a 24 horas ou mais (Niyama *et al.*, 1998).

A curva carga x recalque resultante das leituras inicial e final de cada estágio trata-se de uma curva escalonada. A curva de pontos estabilizados deve passar o mais próximo possível do ponto representativo do final de cada estágio (Niyama *et al.*, 1998).

Os resultados devem ser desenhados, segundo a ABNT NBR 12131:2006, em escala tal que a reta ligando a origem e o ponto da curva correspondente à carga estimada de trabalho resulte numa inclinação de  $20^\circ (\pm 5^\circ)$  com o eixo das cargas. Esta reta corresponde à deformação elástica do elemento (Niyama *et al.*, 1998).

Os resultados constam de relatórios contendo a descrição geral do ensaio, tipo e características da estaca ensaiada, dados de instalação da estaca, referência aos dispositivos de aplicação de carga e de medição dos deslocamentos, ocorrências excepcionais durante o ensaio, tabelas das leituras tempo-recalque e

carga-recalque de todos os estágios, curva carga x deslocamento salientando os tempos de início e do fim de cada estágio (ABNT NBR 12131, 2006).

Segundo a ABNT NBR 6122:1996, para a verificação da capacidade de carga, as provas de carga estáticas devem ser executadas em número de 1 % do conjunto de estacas de mesmas características na obra, respeitando-se o mínimo de uma prova de carga. Caso sejam verificadas as capacidades de carga em 1 % das estacas, em uma etapa preliminar, pode-se reduzir o fator de segurança para 1,6.

### 2.2.2 Controle pela Nega e Repique

O controle pela nega e repique constitui, juntamente com as soluções da Equação da Onda, os métodos dinâmicos. Em geral, métodos dinâmicos são aqueles em que uma previsão da capacidade de carga é feita com base na observação da resposta à cravação, ou a resposta à cravação é especificada visando uma determinada capacidade de carga.

Segundo Velloso e Lopes (2002), a observação da resposta à cravação pode ser feita de diferentes maneiras. Usualmente, o controle *in situ* da capacidade de carga de estacas cravadas é efetuado utilizando-se os sinais do deslocamento máximo obtido em uma determinada seção da estaca.

Algumas formulações matemáticas buscam relacionar a capacidade de carga ao deslocamento, são as chamadas Fórmulas Dinâmicas. Elas são baseadas na medida da nega e do repique durante a cravação de estacas, e, apesar das críticas, continuam sendo uma ferramenta importante para o controle do comprimento de cravação e da capacidade de carga (Gonçalves *et al.*, 2000; Velloso e Lopes, 2004).

#### 2.2.2.1 Registro de Nega e Repique

Em estacas cravadas o controle mais tradicional é realizado através da nega. Ela corresponde a medida da penetração permanente da estaca causada pela

aplicação de uma série de golpes. Geralmente, a nega corresponde a aplicação de dez golpes do martelo (Niyama *et al.*, 1998).

Segundo Velloso e Lopes (2002), a maneira mais simples da obtenção da resposta à cravação consiste em riscar uma linha horizontal na estaca com régua apoiada em dois pontos da torre do bate estacas, aplicar 10 golpes, riscar novamente, medir a distância entre dois riscos e dividi-la por 10, obtendo-se a nega, penetração média por golpe.

O controle através do repique corresponde à obtenção da parcela elástica do deslocamento máximo de uma seção da estaca, originada a partir do impacto da cravação (Niyama *et al.*, 1998). Este valor pode ser obtido através do registro gráfico em folha de papel fixada na seção considerada, movendo-se um lápis lenta e continuamente durante o golpe (Figura 3).

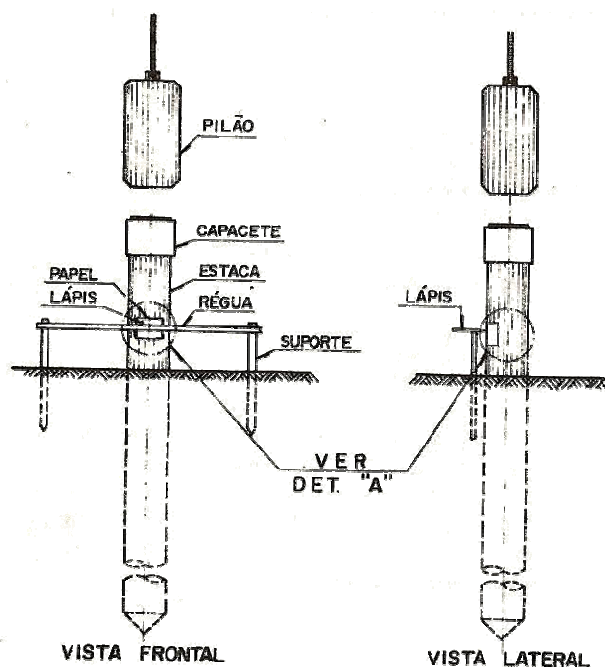


Figura 3 – Obtenção de nega e repique

Fonte: Alonso (1991)

Através desse registro é obtido um sinal que representa de maneira gráfica a deformação do conjunto estaca-solo quando submetidos a um carregamento

dinâmico. O sinal mostra os deslocamentos máximos e mínimos sofridos pelo topo da estaca, porém nem sempre permite determinar o tempo entre os mesmos.

Na realidade, os deslocamentos máximos do topo e do pé não ocorrem ao mesmo tempo. Entretanto, essa maneira de estimar a carga mobilizada, segundo Alonso (1991), apresenta resultados satisfatórios.

O repique ( $K$ ) é composto de duas parcelas: a deformação elástica do fuste da estaca ( $C_2$ ) e o deslocamento elástico do solo sob a ponta da estaca ( $C_3$ ). O deslocamento máximo ( $DMX$ ) é dado pela soma das parcelas de nega e repique, como pode ser visualizado na Figura 4.

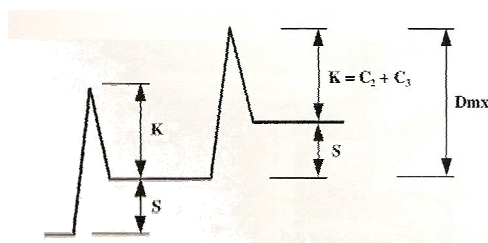


Figura 4 – Registro gráfico de nega e repique

Fonte: Gonçalves *et al.* (2000)

A parcela da deformação elástica da estaca pode ser calculada, a partir da distribuição dos esforços ao longo do fuste, aplicando-se a lei de Hooke. Maiores informações podem ser obtidas em Alonso (1991) e Gonçalves *et al.* (2000).

Segundo Alonso (1991), por ser rotina das firmas executoras de estacas registrarem a nega no fuste do próprio elemento que está sendo cravado, raramente se dispõe de um documento de controle da qualidade, pois esse registro das negas é perdido.

A obtenção dos sinais de nega e repique pode ser efetuada manualmente, de acordo com o processo já mencionado, mecanicamente, através de um registrador de deslocamento dinâmico, ou eletronicamente, através do repicômetro. Para maiores informações, consultar Gonçalves *et al.* (2000).

Para estacas escavadas não existe um procedimento rotineiro de medida, análogo às estacas cravadas, que permita durante a sua instalação estimar a capacidade de carga. A fixação da cota de apoio desses tipos de fundação é baseada fundamentalmente nas investigações geotécnicas (Alonso, 1991).

### 2.2.2.2 Fórmulas Dinâmicas

As Fórmulas Dinâmicas se baseiam em leis da Física que governam o comportamento de corpos que se chocam. Enfocam a conservação da energia, e, algumas delas, incorporam as leis de Newton (Velloso e Lopes, 2002).

Existem diversas fórmulas com a finalidade de descrever os fenômenos resultantes do carregamento dinâmico de uma estaca. Entre elas, pode-se citar: Fórmula dos Holandeses, de Weisbach, de Janbu, de Brix (baseadas na nega) e Fórmula de Hiley, de Chellis-Velloso, de Uto (baseadas no repique).

Segundo a ABNT NBR 6122:1996, as fórmulas dinâmicas, juntamente com os ensaios de carregamento dinâmico, constituem métodos de estimativa da capacidade de carga de fundações profundas, baseados na previsão e/ou verificação do seu comportamento sob ação de carregamento dinâmico.

As fórmulas de controle pela nega foram estabelecidas comparando-se a energia disponível no topo da estaca com aquela gasta para promover a ruptura do solo, em decorrência de sua cravação, somada às perdas, por impacto e por atrito, necessárias para vencer a inércia da estaca imersa na massa de solo (Alonso, 1991), ou seja:

$$W \times H = R \times s + \text{perdas} \quad (1)$$

As principais perdas de energia estão relacionadas ao sistema de impacto e amortecimento. Segundo Velloso e Lopes (2002), em martelos de queda livre são devidas ao atrito do martelo nas guias e dos cabos na roldana, ao repique do martelo, e, às deformações elásticas do cepo, do coxim, da estaca e do solo.

Alguns exemplos são: a fórmula de Sanders, que despreza as perdas de energia, e a fórmula de Wellington, que se baseia na premissa de que parte do trabalho executado pelo martelo é gasto no encurtamento elástico da estaca e, outra parte, na penetração da estaca no solo. Maiores detalhes podem ser encontrados em Velloso e Lopes (2002) e Chellis (1951).

Algumas fórmulas são baseadas na Teoria do Choque de Corpos Rígidos, formulada por Newton, pressupondo-se que o corpo obedece à Lei de Hooke e que

a resistência é mobilizada inteiramente ao longo de toda a massa em movimento, de forma instantânea.

Essa hipótese pode ser aplicada, por exemplo, ao choque entre bolas de bilhar, mas, segundo Alonso (1991), está longe da realidade do movimento das partículas de uma estaca sob a ação de um golpe.

São exemplos: Fórmula de Brix, Fórmula dos Holandeses, Fórmula de Janbu, Fórmula dos Dinamarqueses e a Fórmula de Hiley. Maiores informações podem ser encontrados em Velloso e Lopes (2002) e Chellis (1951).

A utilização do repique como meio de controle de cravação foi inicialmente sugerida por Chellis (1951). Segundo o autor, a resistência à cravação é proporcional ao encurtamento elástico. Uto *et al.* (1985), desenvolveram uma fórmula dinâmica semi-empírica que utiliza o repique e resultados do ensaio SPT. Para maiores detalhes a respeito da utilização do repique consultar Velloso e Lopes (2002) e Chellis (1951).

Segundo Alonso (1991), apesar das críticas, as fórmulas tem aplicação no controle da uniformidade do estaqueamento quando se procura manter, durante a cravação negas aproximadamente iguais para as estacas com carga e comprimento iguais.

### 2.2.3 Tomografia de Estacas

O ensaio de integridade sônico, *Cross-Hole* (*Cross Hole Sonic Logging – CSL*), e a tomografia de estacas baseiam-se na emissão e recepção de pulsos de ultra-som, empregando-se sondas que percorrem o comprimento da estaca no interior de tubos previamente instalados (Antuniutti Neto *et al.*, 2004).

Tem como objetivo a verificação da qualidade da concretagem do fuste. Durante a mesma, são instalados tubos, metálicos ou de PVC, fixados nas armaduras. Para garantir a varredura completa do interior do fuste, os tubos são instalados próximos à periferia da estaca, em círculos, e ao longo de todo o comprimento (Antuniutti Neto *et al.*, 2004).

A tecnologia envolve a geração de pulsos elétricos em uma unidade de controle e aquisição de dados. Uma sonda transmissora e uma receptora operam no interior dos tubos preenchidos com água (Beim *et al.*, 2005).

Em uma sonda transmissora, os pulsos são convertidos em ondas ultra-sônicas, as quais são captadas por uma sonda receptora e convertidas novamente em sinais elétricos (Beim *et al.*, 2005).

A interpretação é efetuada com base no tempo de transmissão do pulso de ultra-som. O princípio físico consiste no fato de que a presença de material de má qualidade no fuste retardará ou impedirá a chegada do sinal emitido (Figura 5).

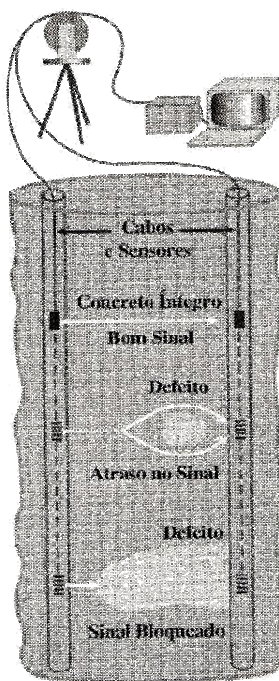


Figura 5 – Princípio do ensaio *Cross-hole*

Fonte: Gonçalves *et al.* (2000)

No início da execução do ensaio o transmissor e o receptor são colocados na porção inferior de dois tubos. Aos poucos se faz com que as sondas percorram simultaneamente a estaca, registrando-se continuamente, com a profundidade, o tempo transcorrido entre a emissão do pulso e sua chegada no receptor e a energia do sinal recebido. O movimento ascendente das sondas dentro dos tubos se dá mediante o acionamento manual ou mecânico de cabos apropriados (Beim *et al.*, 2005).

O ensaio é repetido diversas vezes, selecionando-se novas combinações de tubos. Com isso, possíveis regiões defeituosas poderão ser mapeadas espacialmente, ao longo da profundidade e também por quadrante (Antuniutti Neto *et al.*, 2004).

Os sinais monitorados em campo são analisados com *softwares* específicos, tais como o CHA - *Cross-Hole Analyzer*, produzido pela *Pile Dynamics, Inc.* (PDI), o CHUM - *Cross-Hole Ultrasonic Monitor*, da *Pile Test*, e os equipamentos da série CSL - *Crosshole Sonic Logging*, produzido pela *Olson Instruments, Inc.*

Muitos dos fatores que podem vir a causar um atraso na chegada do pulso de ultra-som, tais como intrusões de solo ou lama bentonítica, concreto de baixa qualidade, ou formação de vazios, levam também a uma diminuição da energia do sinal transmitido. Por esta razão, essa grandeza também é considerada na análise (Antuniutti Neto *et al.*, 2004).

É possível ainda combinar os dados obtidos para vários pares de tubos instalados na estaca, visualizando-se os resultados em duas ou três dimensões (Figura 6). Esse tipo de tratamento facilita a identificação de defeitos e confere ao ensaio uma interpretação objetiva que é conhecida como tomografia de estacas (Antuniutti Neto *et al.*, 2004).

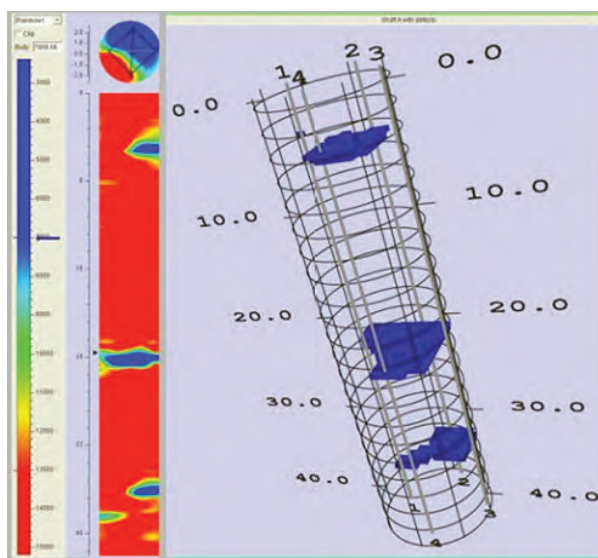


Figura 6 – Tomografia de estaca

Fonte: Hussein e Likins (2005)



O ensaio tem como principal vantagem a objetividade da interpretação, que permite a localização e a quantificação da extensão de eventuais anomalias construtivas (Beim, *et al.*, 2005). Outras vantagens do ensaio de integridade sônico são: não há limitação do comprimento da estaca, a identificação de defeitos é realizada não apenas ao longo do eixo da estaca, mas também na seção transversal, através do ensaio, vários defeitos podem ser detectados (Hussein e Likins, 2005).

As desvantagens incluem a instalação dos tubos, que devem permanecer verticais, durante a concretagem e a interpretação dos dados durante a tomografia, que exige experiência (Hussein e Likins, 2005).

#### 2.2.4 Ensaio de Integridade

O Ensaio de Integridade visa determinar a variação das características do concreto ao longo da profundidade da estacas. A forma usual do ensaio consiste na fixação de um acelerômetro de alta sensibilidade no topo da estaca, por meio de um material viscoso, geralmente cera de petróleo, e na aplicação de sucessivos golpes com um martelo de mão, como pode ser visualizado na Figura 7 (PDI, 2008).



Figura 7 – Ensaio de integridade e equipamento PIT

Fonte: Hussein e Likins (2005)

O sinal obtido pelo acelerômetro é digitalizado através de um microcomputador e posteriormente integrado para a obtenção da velocidade (Gonçalves *et al.*, 2000). Considerações a respeito da obtenção, manipulação e análise dos sinais são apresentadas em Rausche *et al.* (1992).

O ensaio é realizado com auxílio de equipamentos específicos, tais como o PIT (*Pile Integrity Tester*), produzido pela PDI (*Pile Dynamics, Inc.*), o PET (*Pile Echo Tester*) da *Pile Test* e o SIT (*Sonic Integrity Testing*), produzido pela *Profound BV*.

Segundo Kormann (2002), os golpes geram uma onda de tensão, que trafega ao longo da estaca. Quando a onda alcança a ponta do elemento, uma reflexão é gerada, a qual faz então o caminho de volta, se deslocando para o topo. A onda sofre reflexões ao encontrar qualquer variação nas características do material (área de seção, peso específico ou módulo de elasticidade) ou defeito (Figura 8).

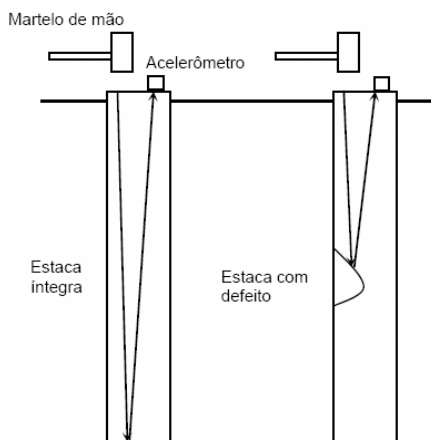


Figura 8 – Princípio do Ensaio de Integridade

Fonte: Kormann (2002)

De acordo com Gonçalves, *et al.* (2000), a verificação da integridade da estaca é efetuada através da análise do formato do sinal de velocidade medido, resultado típico do ensaio.

Variações de impedância podem ser detectadas pela variação do sinal de velocidade (Figura 9). Para facilitar a localização das variações de impedância ao longo da estaca, convertem-se os tempos em uma escala de comprimentos.

É usual a aplicação de vários golpes seqüenciais, para que seja realizada uma média dos sinais correspondentes. Isso permite a filtragem de interferências

randômicas, sobressaindo no sinal apenas variações causadas pelas reflexões da onda (PDI, 2008).

Conhecendo-se a velocidade de propagação da onda e o tempo transcorrido entre a aplicação do golpe e a chegada da reflexão correspondente à variação de características pode-se determinar a exata localização dessa variação.

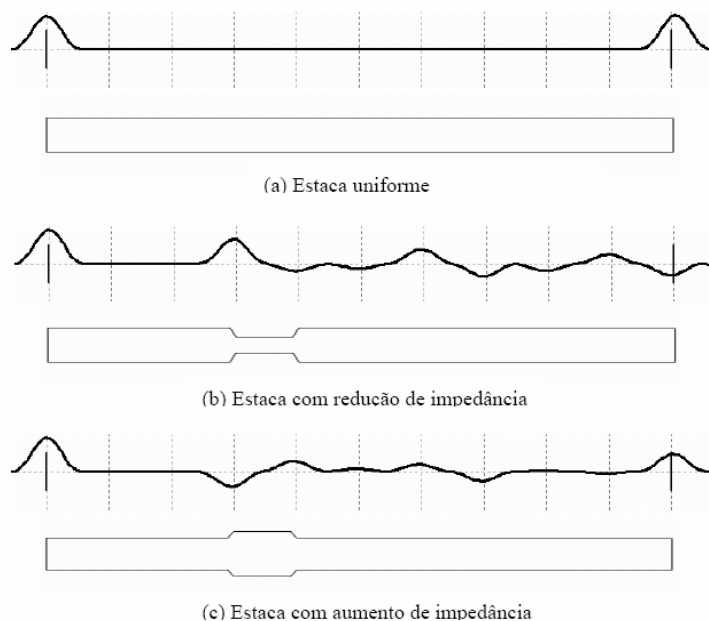


Figura 9 – Exemplo de sinais de velocidade obtidos no ensaio

Fonte: Kormann (2002)

A onda se propaga ao longo do fuste com uma velocidade que é função exclusivamente das características do material da estaca (PDI, 2008). A velocidade de propagação  $c$  é dada por:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

De acordo com Kormann (2002), em estacas de concreto, as velocidades de propagação de onda associadas aos níveis de deformação do ensaio de integridade situam-se usualmente entre 3500 e 4300 m/s. Caso sejam conhecidos o comprimento  $L$  da estaca e o tempo  $T$  que o pulso leva para alcançar a ponta e

retornar ao topo, pode-se calcular uma velocidade de propagação média a partir da relação:

$$c = \frac{2L}{T} \quad (3)$$

A impedância  $Z$  é definida como a resistência imposta pela estaca à mudança de velocidade das partículas (Gonçalves *et al.*, 2000). E pode ser dada pela seguinte equação:

$$Z = \frac{EA}{c} \quad (4)$$

O uso mais comum do ensaio é a detecção de falhas na concretagem de estacas moldadas *in loco*. No entanto, o ensaio pode também ser usado para determinar ou confirmar o comprimento de estacas de concreto (PDI, 2008).

Para que o ensaio possa ser realizado, é necessário que a estaca tenha uma área de seção que permita a colocação do sensor, a aplicação dos golpes e a propagação da onda. Isso dificulta a aplicação deste método em estacas metálicas.

No caso de estacas pré-moldadas de concreto, essas considerações também se aplicam. Esse tipo de estaca costuma ter emendas. A onda será capaz de passar pela emenda sem sofrer qualquer reflexão apenas se o contato entre os dois elementos emendados for perfeito (PDI, 2008).

Outra dificuldade está relacionada às estacas que apresentam várias variações de impedância ao longo do fuste. As reflexões secundárias provocadas pela primeira grande variação de área de seção que a onda encontrar podem tornar confuso o diagnóstico da estaca abaixo desse ponto (PDI, 2008).

É necessário um preparo prévio da estaca. Todo o concreto de má qualidade existente no topo deve ser eliminado. É preciso criar uma superfície plana e lisa com uma lixadeira. O topo da estaca deverá estar acessível e seco (PDI, 2008). A presença de água não inviabiliza a execução do ensaio, desde que os pontos em que o acelerômetro será posicionado estejam secos (Kormann, 2002).

Não se pode utilizar argamassa ou qualquer outro material no topo da estaca, a fim de regularizá-lo. O acelerômetro e os golpes têm que ser aplicados em material idêntico ao do restante da estaca (PDI, 2008).

Segundo Kormann (2002), variações de atrito lateral também produzem reflexões, sendo importante comparar a tendência dos sinais monitorados com o perfil geotécnico da obra.

Apesar de sua simplicidade operacional, a interpretação dos sinais pode se tornar bastante complexa. O ensaio identifica variações de impedância, porém, não é possível diferenciar se eventuais danos diagnosticados constituem-se em reduções de seção transversal ou em alterações nas propriedades do concreto. Além disso, os sinais monitorados podem indicar danos que, na realidade, não comprometem a utilização da estaca (Kormann, 2002).

Outra limitação do ensaio diz respeito ao comprimento da estaca. A energia do golpe do martelo tende a se dissipar gradualmente, em função de efeitos de amortecimento que ocorrem no próprio material da estaca e devido à ação do atrito lateral. Recomenda-se a execução em estacas cuja relação entre o comprimento e o diâmetro seja inferior a 30 (Gonçalves *et al.*, 2000; Kormann, 2002).

O ensaio de integridade não possui norma específica no Brasil, no entanto tem sido largamente utilizado, notavelmente em estacas escavadas para verificação do comprimento efetivo e da existência de danos (Gonçalves *et al.*, 2000). Trata-se de um ensaio simples, rápido e de baixo custo, por esta razão, uma grande quantidade de estacas podem ser ensaiadas no local da obra (Rausche *et al.*, 1988).

Este procedimento é conhecido como ensaio de baixa deformação e é assim denominado pelo impacto causado por um martelo de mão, provando um baixo nível de deformação (Niyama *et al.*, 1998). Já o ensaio de carregamento dinâmico é considerado de alta deformação.

Basicamente, o ensaio de alta deformação foi idealizado para estacas cravadas, enquanto que o de baixa deformação fora desenvolvido a fim de suprir a carência na verificação de integridade e qualidade da concretagem em estacas moldadas *in loco* (Rausche *et al.*, 1992).

Diversos fatores podem intervir na utilização de um ou outro método. A quantidade de estacas, o comprimento das mesmas, a importância da obra, a finalidade do ensaio, o custo e o prazo da obra são alguns exemplos. Os princípios, aplicações e limitações para ambos são discutidos em Rausche *et al.* (1988).

## 2.3 ENSAIO DE CARREGAMENTO DINÂMICO

O Ensaio de Carregamento Dinâmico (ECD), segundo a ABNT NBR 13208:2007, tem como objetivo avaliar as cargas mobilizadas na interface solo-estaca, a eficiência do sistema de impacto, as tensões de compressão e de tração ao longo da estaca, a integridade estrutural e as características dinâmicas do sistema solo-estaca.

O ensaio consiste na aplicação de um carregamento dinâmico axial à estaca para a estimativa da capacidade de carga, além de outras informações, através da Teoria da Equação de Onda aplicada à estaca, com base no modelo idealizado por Smith (1960).

Em uma visão holística do ensaio diversos métodos de cálculo e procedimentos computacionais estão envolvidos.

O ensaio é baseado na aquisição de dados de força e velocidade da onda de tensão provocada por um golpe. Os sinais, advindos de instrumentação, são captados e armazenados através de um analisador de cravação, como o equipamento PDA<sup>®</sup> - *Pile Driving Analyzer*, da PDI (*Pile Dynamics, Inc.*) e o FPDS – *Foundation Pile Diagnostic Systems*, da TNO *Building and Construction Research Organisation*.

O equipamento PDA<sup>®</sup>, utilizado na obtenção dos sinais de campo utilizados nesta pesquisa, realiza um cálculo da capacidade de carga através do Método CASE<sup>®</sup>. Este método consiste em uma solução matemática fechada, baseada em hipóteses simplificadoras, tais como a homogeneidade e uniformidade da estaca e deve ser confirmado por uma análise numérica.

A análise numérica executada através do programa CAPWAP<sup>®</sup>, por exemplo, realiza um processo iterativo baseado na teoria da equação da onda. Neste método, uma curva dependente de parâmetros adotados é ajustada à curva de força medida, permitindo o refino dos mesmos.

Na sequência, o modelo, os equipamentos e os procedimentos utilizados nas análises do ensaio de carregamento dinâmico encontram-se detalhados.

### 2.3.1 Teoria da Equação da Onda aplicada às Estacas

Quando uma estaca é solicitada pelo impacto de um martelo uma zona do material é comprimida. Essa compressão causa uma tensão que será transmitida para camadas subseqüentes. O processo contínuo de compressão desenvolve uma onda de tensão que se propaga ao longo da estaca (Bernardes, 1989).

Durante a cravação, a estaca é carregada axialmente por uma força  $F$ , causada pelo impacto do martelo. Em um primeiro instante,  $t$ , todas as partículas da estaca ainda estão no repouso, como esquematizado na Figura 10a.

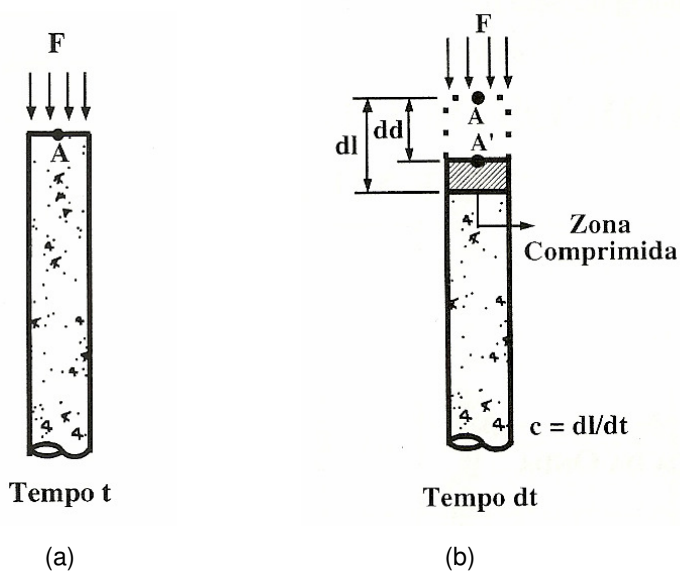


Figura 10 – (a) Partículas no repouso; (b) Partículas aceleradas

Fonte: Gonçalves *et al.* (2000)

Em um intervalo de tempo  $dt$  após o impacto, um primeiro elemento,  $dl$ , é comprimido e sofre uma deformação  $dd$  (Figura 10b). Então, as partículas do material, representadas pelo ponto A, que inicialmente estavam no repouso, são aceleradas.

A deformação  $dd$  pode ser calculada através da Lei de Hooke:

$$dd = \frac{F \cdot dl}{E \cdot A} \quad (5)$$

Sendo  $c$  a velocidade de onda, a partícula  $A$  que foi acelerada para a posição representada por  $A'$  apresenta a velocidade  $dv$  dada pela Equação 6.

$$dv = \frac{dd}{dt} = \frac{F \cdot dl}{E \cdot A \cdot dt} = \frac{F \cdot c}{E \cdot A} \quad (6)$$

Sendo as definições de tensão, relação entre a força e a área, e deformação, relação entre a tensão e o módulo de elasticidade, temos:

$$dv = \frac{\sigma \cdot c}{E} = \varepsilon \cdot c \quad (7)$$

A aceleração da partícula pode ser dada por:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{F \cdot c}{E \cdot A \cdot dt} \quad \text{e} \quad a = \frac{F}{m} = \frac{F}{\rho \cdot dl \cdot A} \quad (8) \text{ e } (9)$$

De onde temos:

$$\frac{c}{E \cdot dt} = \frac{1}{\rho \cdot dl} \quad (10)$$

E então:

$$c^2 = \frac{E}{\rho} \quad (11)$$

Ou seja, a velocidade de onda é função das propriedades do material da estaca. É a velocidade com que as zonas de compressão ou de tração se movem ao longo da estaca.



Já a velocidade das partículas,  $V$ , é a velocidade com a qual as mesmas se movimentam quando a onda se propaga.

A estaca impõe uma resistência, conhecida como impedância ( $Z$ ), à mudança de velocidade das partículas. A impedância pode ser representada das seguintes maneiras:

$$Z = \rho \cdot c \cdot A = \frac{m \cdot c}{l} = \frac{E \cdot A}{c} \quad (12)$$

Das equações, temos que:

$$F = \frac{dv \cdot E \cdot A}{c} \quad \text{e} \quad Z = \frac{E \cdot A}{c}, \quad \text{então} \quad F = dv \cdot Z \quad (13), (14) \text{ e } (15)$$

Considerando o equilíbrio dinâmico de um segmento da estaca em qualquer instante, sabendo-se que a aceleração pode ser dada pela segunda derivada do deslocamento em relação ao tempo e igualando-se a força dada pela segunda lei de Newton à força dada pela lei de Hooke, obtém-se uma solução geral da equação unidimensional da onda, conhecida como:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (16)$$

Essa equação, conhecida como a Equação de D'Alembert (Dyminski, 2000), descreve o deslocamento ( $u$ ) de uma partícula no espaço, a uma distância  $x$  do topo da estaca, e no tempo ( $t$ ), provocado pela propagação de uma onda de velocidade  $c$ .

A solução geral da equação, inicialmente apresentada por D'Alembert (1747, *apud* Bernardes, 1989), considera algumas hipóteses simplificadoras, tais como, seção transversal uniforme, material isotrópico, tensão axial uniformemente distribuída sobre a seção transversal, e pode ser expressa como a soma de duas funções:

$$u(x, t) = f(x - ct) + g(x + ct) = u \downarrow + u \uparrow \quad (17)$$

As funções  $f$  e  $g$  correspondem a duas ondas que se propagam com a mesma velocidade, mas em direções contrárias. As ondas se deslocam em direções opostas no tempo, mas não mudam de forma. É usual utilizarem-se flechas para referenciar o sentido de propagação das mesmas (Gonçalves *et al.*, 2000).

A forma das ondas depende das condições de contorno do problema. Soluções analíticas para a onda inicial podem ser encontradas no trabalho de Bernardes (1989).

Similarmente, a força e a velocidade de deslocamento da partícula podem ser representadas por duas funções, e, esquematicamente, teremos:

$$F = F_{\downarrow} + F_{\uparrow} = V_{\downarrow}Z + V_{\uparrow}Z \quad \text{e} \quad V = V_{\downarrow} + V_{\uparrow} \quad (18) \text{ e } (19)$$

O ensaio de carregamento dinâmico é baseado nos sinais de força e velocidade multiplicada pela impedância, obtidos através da instrumentação instalada no topo da estaca.

#### 2.3.1.1 Propagação de Ondas

A onda descendente inicial gerada pelo impacto do martelo é formada por forças compressivas. Esta onda se propaga ao longo do fuste e quando encontra a ponta da estaca é refletida (Gonçalves *et al.*, 2000).

Se a ponta da estaca encontra-se livre, a onda é refletida como força de tração. Na Figura 11, podemos ver a representação das ondas de compressão e tração que se propagam em uma estaca íntegra, idealizada, e de ponta livre.

Percebe-se que com o aumento da influência do atrito lateral o efeito das ondas de compressão e tração é absorvido ao longo do fuste.

Com relação à velocidade, ao receberem uma onda de compressão devido ao impacto, as partículas se movimentam no sentido da força (tensão de compressão, deslocamento da partícula para baixo), com uma velocidade considerada positiva.

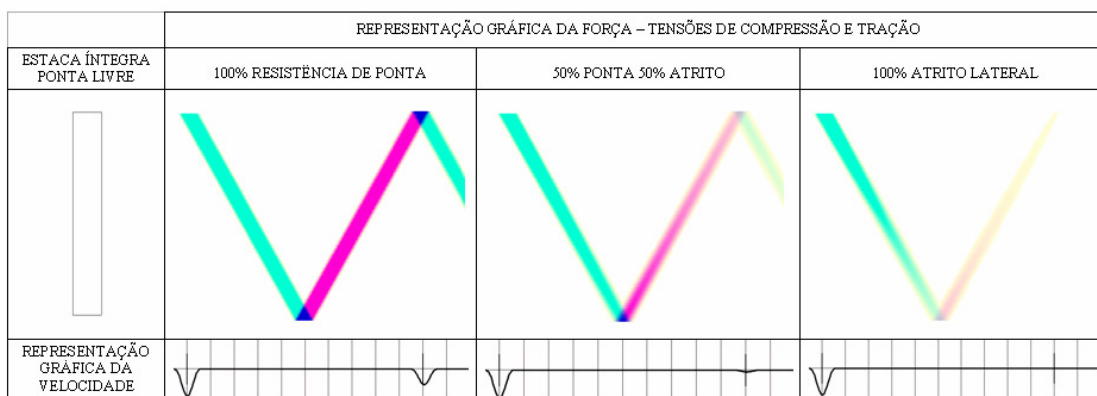


Figura 11 – Força e velocidade em estaca íntegra de ponta livre

Fonte: O Autor (2009), adaptado de Pilewave™ (2006)

Quando ocorre a reflexão da onda na forma de tração, as partículas passam a ser aceleradas no sentido inverso da propagação, ou seja, uma onda de tração causa movimentação de partículas no sentido contrário de propagação. Desta maneira, as partículas continuam se movimentando com uma velocidade positiva. É o que pode ser observado na representação gráfica da velocidade da partícula, na Figura 11.

Gonçalves *et al.* (2000), ilustra o fenômeno de propagação da força e da velocidade em uma estaca de ponta livre com a representação de flechas (Figura 12).

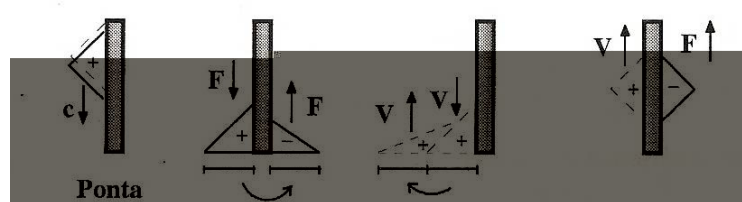


Figura 12 - Reflexões das ondas em estaca de ponta livre

Fonte: Gonçalves *et al.* (2000)

Caso a ponta de uma estaca íntegra, idealizada, esteja fixa, ou seja, engastada, a onda refletida na ponta é de compressão. O atrito lateral tende a absorver a energia e, conseqüentemente, as forças provocadas pelo impacto, o que pode ser visualizado na Figura 13.

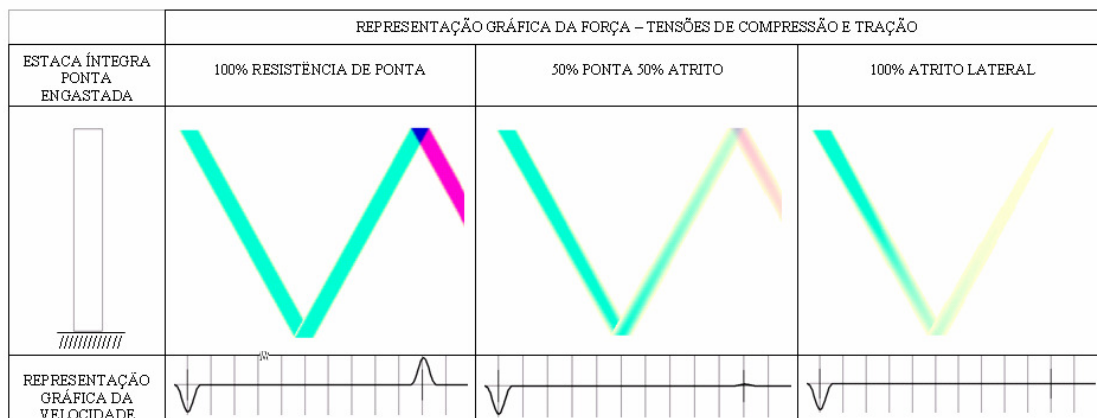


Figura 13 – Força e velocidade em estaca íntegra de ponta engastada

Fonte: O Autor (2009), adaptado de Pilewave™ (2006)

Com relação à velocidade, ao receberem uma onda de compressão devido ao golpe do pilão, as partículas se movimentam no sentido da força e a uma velocidade positiva, com deslocamento descendente. Quando ocorre a reflexão da onda na forma de compressão, as partículas passam a ser aceleradas no mesmo sentido da propagação. Desta maneira, as partículas passam a se movimentar no sentido contrário, com uma velocidade negativa e deslocamento ascendente. É o que pode ser observado na representação gráfica da velocidade da partícula na Figura 13 e no esquema apresentado na Figura 14.

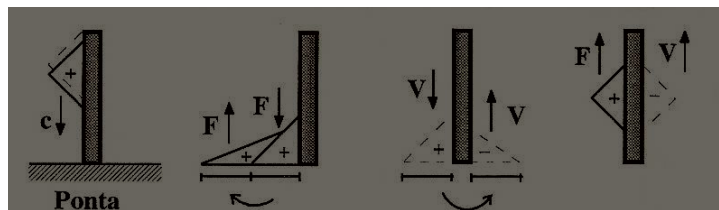


Figura 14 – Reflexões das ondas em estaca de ponta engastada

Fonte: Gonçalves *et al.* (2000)

Quando a estaca não se encontra íntegra, ocorrem reflexões antes do tempo esperado. As Figuras 15 e 16 representam a propagação de ondas e velocidades em uma estaca não íntegra, analogamente ao que já foi abordado.

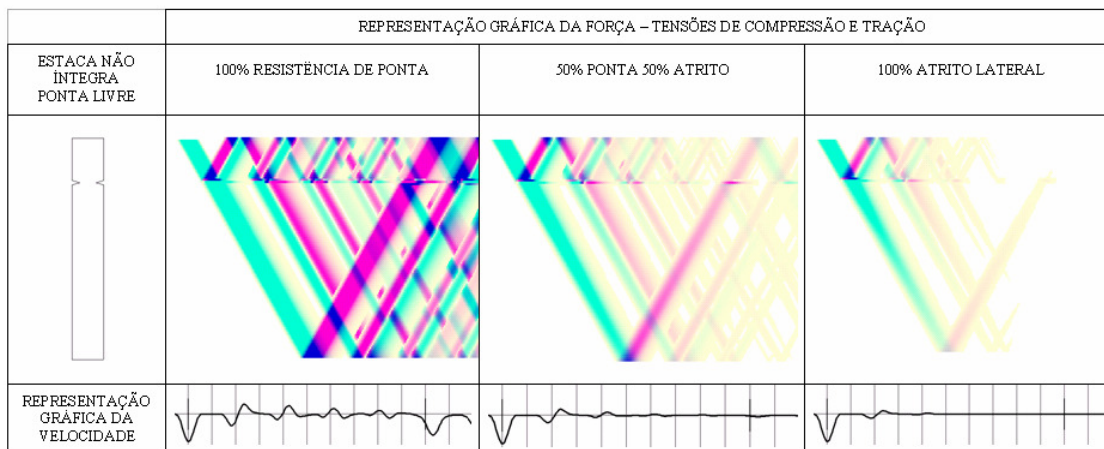


Figura 15 – Força e velocidade em estaca não íntegra de ponta livre

Fonte: O Autor (2009), adaptado de Pilewave™ (2006)

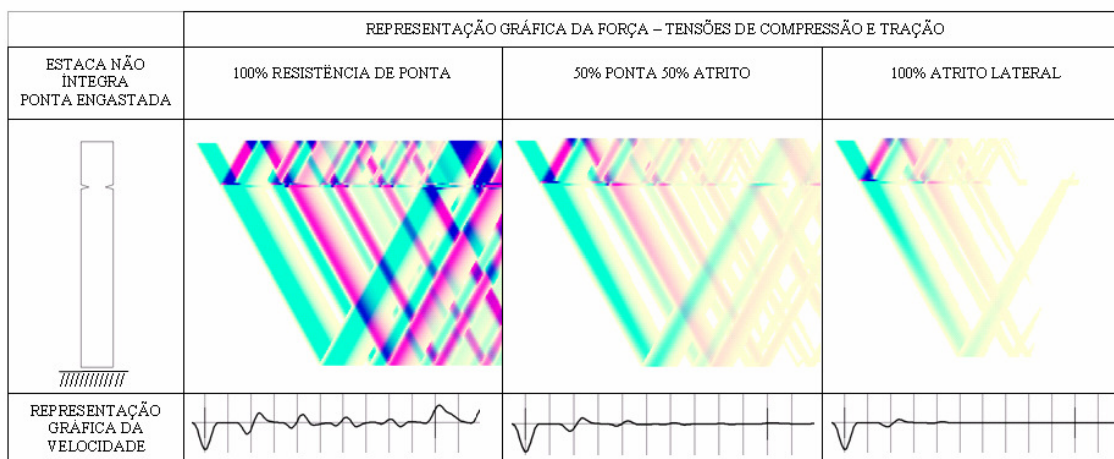


Figura 16 – Força e velocidade em estaca não íntegra engastada

Fonte: O Autor (2009), adaptado de Pilewave™ (2006)

Quando consideramos variações de impedância, temos comportamentos semelhantes. Reflexões ocorrerão antes do tempo previsto.

Caso a estaca apresente redução de impedância, a onda refletida na interface  $Z_1-Z_2$  ( $Z_1 > Z_2$ ) é de tração. Caso a estaca apresente aumento de impedância, a onda refletida na interface  $Z_1-Z_2$  ( $Z_1 < Z_2$ ) é de compressão. Isto pode ser visualizado na Figura 17.

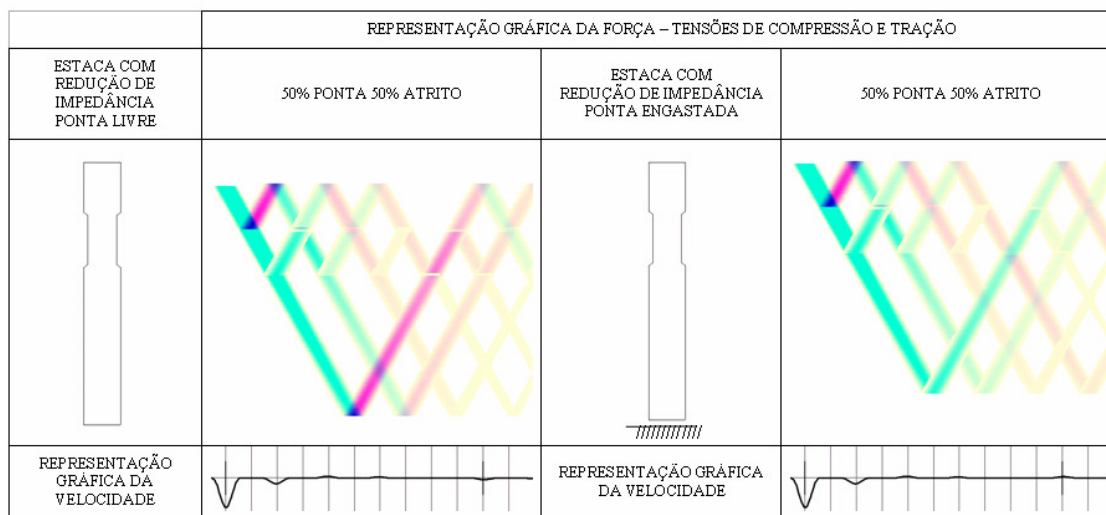


Figura 17 – Força e velocidade em estaca com variação de impedância

Fonte: O Autor (2009), adaptado de Pilewave™ (2006)

Ao considerarmos que a força é igual à velocidade multiplicada pela impedância, as divergências entre as curvas de  $F$  e  $ZV$  em elementos reais são devidas a variações de impedância e ao atrito lateral, ou eventuais desaprumos, emendas e trincas. Exemplos de sinais evidenciando essas variações são discutidos em Gonçalves *et al.* (1996).

### 2.3.1.2 O Modelo de Smith e a Equação da Onda

Segundo Smith (1960), o carregamento dinâmico de uma estaca não é um problema de impacto entre corpos rígidos, como considerado nas mencionadas Fórmulas Dinâmicas, e sim de transmissão de ondas longitudinais.

Smith desenvolveu um método matemático para a análise do carregamento dinâmico de estacas baseado na propagação de uma onda de tensão. O conjunto de equações utilizadas pelo autor pode ser encontrado no artigo original (Smith, 1960) e em Velloso e Lopes (2002).

No modelo de Smith (1960), os componentes envolvidos, tais como martelo, estaca, sistemas de amortecimento, são representados como uma série de pesos e molas (Figura 18).

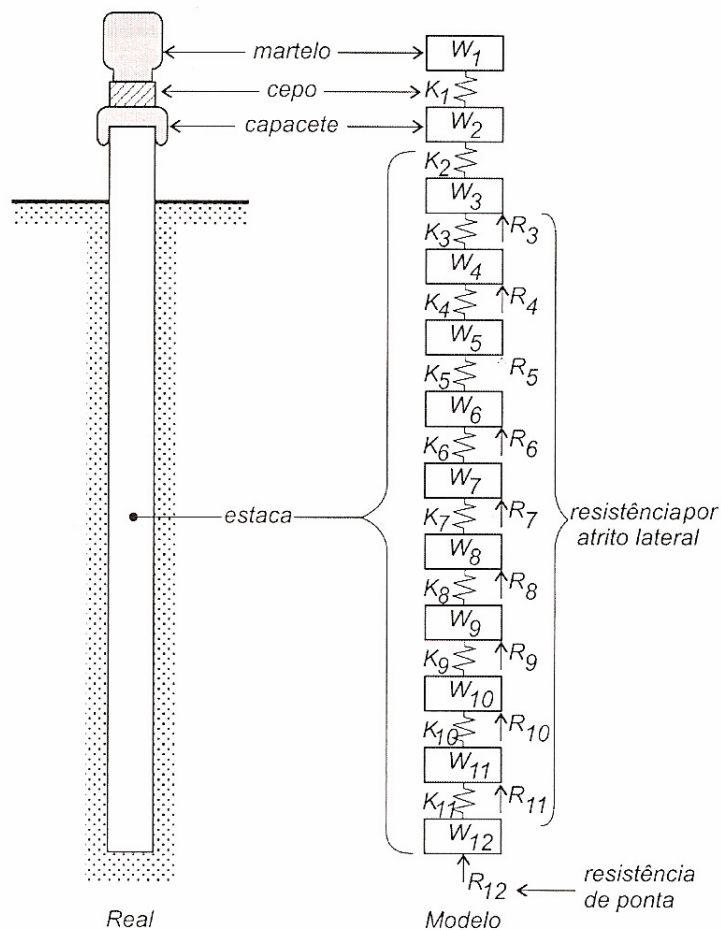


Figura 18 – Esquema de pesos e molas proposto por Smith (1960)

Fonte: Velloso e Lopes (2002)

Para o cálculo, cada componente é considerado separadamente no intervalo de tempo. Para cada intervalo, são calculadas cinco variáveis: o deslocamento do peso, em relação a posição inicial, a compressão da mola, a força exercida pela mola, a força resultante atuante no peso e a velocidade do peso (Velloso e Lopes, 2002).

Ao se dividir uma estaca em pesos e molas, o comprimento unitário escolhido precisa ser consideravelmente menor do que o comprimento de onda de

tensão produzida pelo martelo (Smith, 1960). E, quanto menor o comprimento unitário escolhido, menor deve ser o intervalo de tempo considerado.

As regras para se fazer a simulação numérica de um carregamento dinâmico, segundo Smith (1960), são: dividir o tempo em pequenos intervalos e admitir que o valor da velocidade, força e deslocamento são fixos no intervalo de tempo. As velocidades, forças e deslocamentos para cada intervalo serão computados e se apresentarão ligeiramente diferentes do intervalo anterior. Assim, pode-se representar a variação.

Programas computacionais conhecidos como Equação da Onda, *Wave Equations*, foram desenvolvidos para a simulação da cravação de estacas. Entre eles estão o WEAP (Goble e Rausche, 1976), o TTI (Hirsch *et al.*, 1976), o ZWAVE (Warrington, 1988) e o TNOWAVE (Middendorp e Verbeek, 2006).

O programa WEAP, *Wave Equations Analysis of Piles* (Goble e Rausche, 1976; Goble, *et al.*, 1981), baseado no modelo discreto de equação da onda proposto por Smith (1960), será utilizado neste trabalho, e, por esta razão, receberá especial atenção.

A versão atual do inicialmente intitulado WEAP Program<sup>8</sup>, GRLWEAP<sup>TM</sup> (PDI, 2002), simula os movimentos e as forças produzidas pelo impacto de um martelo em uma estaca através da teoria da equação da onda.

Através dele é possível realizar o estudo de cravabilidade, recomendado para dimensionar o sistema de impacto, principalmente, na aplicação do ensaio de carregamento dinâmico em estacas moldadas *in loco* (Navajas e Niyama, 1996; Likins e Hussein, 1995).

Na fase de projeto de fundações, uma análise GRLWEAP<sup>TM</sup> pode otimizar a escolha do tipo e o comprimento de uma estaca cravada dadas as condições do carregamento, visto que as diversas soluções podem ser comparadas através das simulações (Rausche, 1999).

A análise é aplicável à avaliação da capacidade de suporte de uma estaca em execução ou já executada, podendo-se estudar a capacidade de carga no tempo (cravação ou recravação), as tensões durante a cravação e o número de golpes esperados para uma dada capacidade de carga estática (PDI, 2002).

---

<sup>8</sup> Wave Equation Analysis of Pile Driving (Goble *et al.*, 1981)



Em geral, os dados de entrada das simulações referem-se às características do sistema de impacto, dados da estaca e do solo. Fornecidos esses dados e a capacidade de carga estimada, o programa calcula o número de golpes necessários para a obtenção de um deslocamento permanente, as tensões axiais na estaca e a energia transferida do sistema para a estaca (PDI, 2002).

Alguns dos parâmetros que influenciam no modelo proposto por Smith (1960), são as características dos sistemas de impacto e amortecimento.

#### 2.3.1.2.1 Parâmetros do Modelo

A equação da onda se difere das fórmulas dinâmicas principalmente na consideração dos fatores de perdas de energia no sistema de amortecimento, na estaca e no solo, que são matematicamente modelados.

Para o cálculo das perdas no sistema de amortecimento, o modelo necessita essencialmente de três parâmetros: a rigidez, o coeficiente de restituição e o peso do capacete. Para a estimativa das perdas na estaca são necessários o módulo de elasticidade, o peso específico do material e um *damping* do material da fundação. E, para o cálculo das perdas de energia no solo, são considerados a rigidez do solo e o *damping*.

A partir da medição de força e velocidade no topo, a energia transferida à estaca é determinada através da Equação 20:

$$E(t) = \int_0^t F(t) \cdot V(t) \cdot dt \quad (20)$$

De acordo com Goble *et al.* (1980), o máximo da função é referido como ENTHRU. A eficiência do sistema é definida como a relação entre a energia potencial e a energia líquida transferida à estaca.

Em resumo, de acordo com Hussein *et al.* (1996), uma análise de equação da onda, através do GRLWEAP<sup>TM</sup>, necessita dos seguintes parâmetros:

- Dados do martelo: peso, condições de queda, altura da queda e eficiência;

- Dados do amortecimento: área, espessura, módulo de elasticidade e coeficiente de restituição;
- Dados do capacete: peso;
- Características da estaca: comprimento, área, densidade e módulo de elasticidade;
- Características do solo: valor e distribuição da resistência estática, valores de *quake* e *damping* ao longo do fuste e na ponta.

Estes parâmetros serão abordados na sequência.

#### 2.3.1.2.2 Sistema de Impacto e Amortecimento

O sistema de impacto é o responsável pela aplicação do carregamento axial na estaca. Ele deve apresentar energia potencial suficiente para provocar uma força de impacto capaz de gerar deslocamentos permanentes da ponta da estaca, e mobilizar as resistências das camadas de solo atravessadas pelo fuste (ABNT NBR 13208, 2007).

Segundo a ABNT NBR 13208: 2007, durante a execução do ECD, dispositivos de amortecimento devem ser empregados entre o topo da estaca e o sistema de aplicação do impacto, visando à integridade estrutural da estaca a ser ensaiada.

No Brasil freqüentemente são utilizados martelos de queda livre. Segundo a ABNT NBR 6122:1996, deve ser posicionado de forma a garantir a aplicação de impacto centrado e axial em relação ao topo da estaca.

O GRLWEAP<sup>TM</sup> permite a escolha de diversos tipos de martelo, eficiência e modelos de análise (Rausche e Klesney, 2007; PDI, 2002). Um martelo de queda livre é identificado no programa como um martelo de combustão externa (*External Combustion Hammers* – ECH). Essa classe inclui os martelos acionados a ar, vapor, sistema hidráulico ou por cabos.

A eficiência do martelo é a variável que traduz as perdas de energia que ocorrem em função de atritos internos ao equipamento. Dentre os parâmetros do sistema de aplicação de impacto, é o que mais afeta os resultados, tendo grande

efeito na intensidade das ondas geradas na estaca em decorrência do impacto do pilão (Kormann, 1993).

Para martelos de queda livre, a eficiência pode ser definida como a razão entre a energia cinética que o pilão apresenta no momento do impacto e a energia potencial que o mesmo possuía quando se encontrava em sua posição inicial, dada pela expressão:

$$\eta = \frac{V_{ri}^2}{2gH} \quad (21)$$

O martelo é o mais simples e mais importante componente do modelo (PDI, 2002). Geralmente, uma única massa é o suficiente para representá-lo.

No modelo de Smith (1960), o martelo e o capacete são considerados rígidos, portanto, são representados por pesos individuais sem elasticidade (respectivamente W1 e W2 na Figura 18).

O cepo, de madeira, plástico ou outro material, é representado como uma mola (K1 na Figura 18). Segundo Velloso e Lopes (2002), podem ter ou não um comportamento elástico. Caso apresentem um comportamento não elástico, o diagrama da Figura 19 caracteriza o coeficiente de restituição ( $e$ ). O coeficiente é dado pela raiz da razão entre as áreas BCD e ABC.

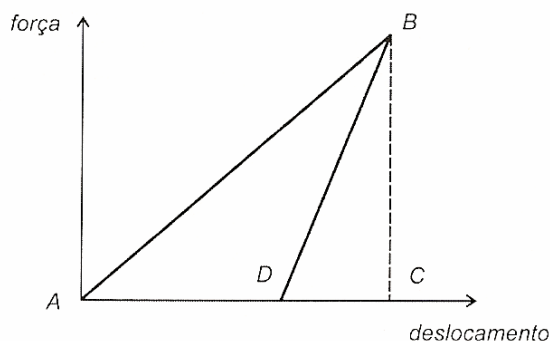


Figura 19 – Diagrama do cepo adotado por Smith (1960)

Fonte: Velloso e Lopes (2002)

No GRLWEAP™ o modelo do amortecimento, mostrado na Figura 20, é diferente do proposto por Smith (1960).

Durante a compressão as forças aumentam quadraticamente com a deformação. Ao atingir uma determinada deformação,  $d_{sc}$ , denominada *round-out* ou *compressive slack*, correspondente a uma força limite, as forças passam a aumentar linearmente, com uma inclinação dada pela rigidez ( $k$ ). No descarregamento, a força diminui linearmente até a força limite, sob uma inclinação dada pela relação  $k/e^2$ , a partir da qual passa a apresentar um ajuste parabólico.

Durante a tração o mesmo procedimento é realizado, porém, só se inicia a partir de uma determinada extensão da mola,  $d_{sl}$ , denominada *slack distance*. Durante esta extensão, a força permanece nula.

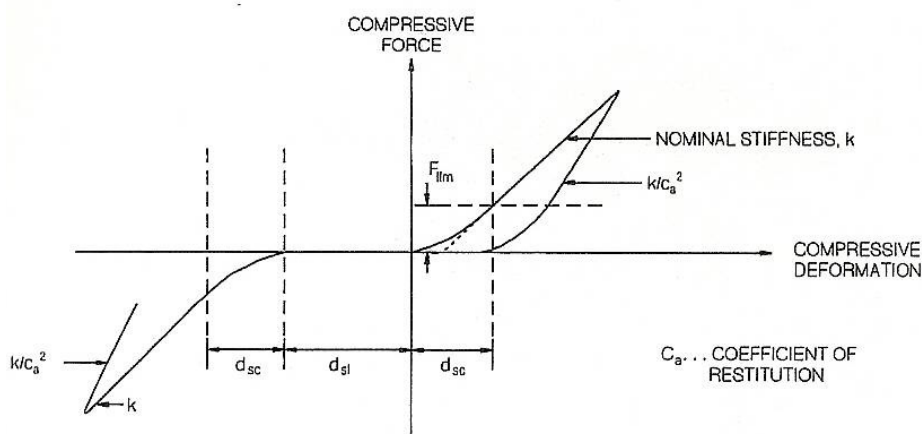


Figura 20 – Diagrama do cepo adotado pelo GRLWEAP™

Fonte: PDI (1998)

De acordo com PDI (2002) o coeficiente de restituição ( $e$ ) é uma propriedade do material que indica a fração de energia temporariamente armazenada durante a compressão. Para elementos de madeira, usualmente é recomendado o valor de 0,5.

O coeficiente de restituição é um parâmetro que influencia a ordenada máxima dos sinais de força e velocidade, a energia transmitida e a nega (Kormann, 1993).

A rigidez ( $k$ ), que consiste na inclinação do trecho de carregamento, pode ser expressa em função das propriedades do cepo, segundo a Equação 22.

$$k = \frac{Ec \cdot Ac}{t} \quad (22)$$

De acordo com Kormann (1993), a rigidez exerce influência sobre a ordenada máxima do sinal de força, sendo importante no controle das tensões impostas pelo martelo à estaca.

### 2.3.1.2.3 Modelo do Solo

Com relação à resistência oferecida pelo solo, duas componentes podem ser destacadas: a estática e a dinâmica (Figura 21). A resistência estática, de comportamento elasto-plástico, proporcional ao deslocamento, é dada por uma mola; enquanto que a dinâmica, considerada viscosa, proporcional à velocidade de deslocamento e à resistência estática, é dada por um amortecedor (Velloso e Lopes, 2002).

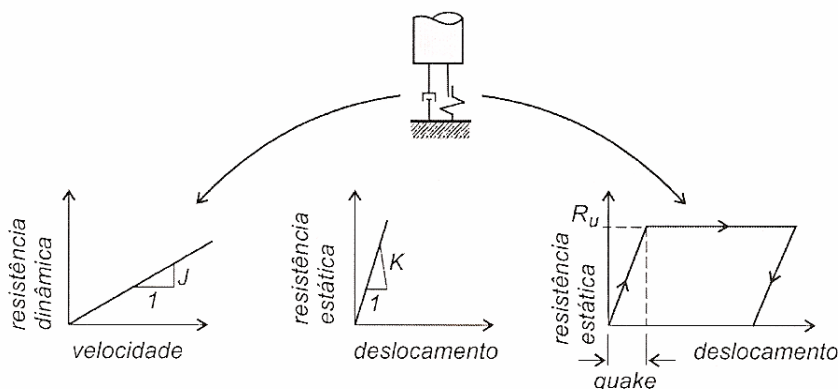


Figura 21 – Modelo de representação do solo

Fonte: Velloso e Lopes (2002)

Smith (1960) denominou a deformação elástica do solo, C3, de *quake* (Q). O conceito está ilustrado na Figura 22. Partindo da origem O, a ponta da estaca se move até uma distância Q, comprimindo o solo elasticamente até o ponto A, mobilizando a resistência última  $R_u$ . Uma ruptura plástica ocorre e a resistência permanece igual a  $R_u$  até que a ponta da estaca alcance o ponto B, quando uma

recuperação elástica de valor igual a  $Q$  ocorre, cessando a movimentação no ponto C. A deformação permanente é dada por  $s$  (Smith, 1960).

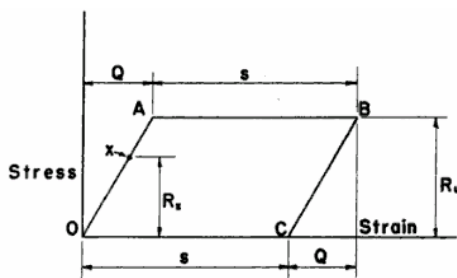


Figura 22 – Tensão x deformação na ponta da estaca

Fonte: Smith (1960)

Então, o *quake* ( $Q$ ) define o deslocamento para o qual a resistência estática última ( $R_u$ ) é atingida (Velloso e Lopes, 2002). Smith sugere o valor de *quake* igual a 2,54 mm para a ponta e para o atrito, independente do solo. O valor sugerido pelo GRLWEAP<sup>TM</sup> é de 2,5 mm para todos os tipos de solo, ponta e fuste. Valores de *quake* equivalentes a até o diâmetro da estaca dividido por 120 são considerados normais. Valores muito acima disso podem significar solo resiliente na ponta (PDI, 2008).

O solo oferece uma resistência instantânea quando submetido a movimentos, a resistência dinâmica (Figura 23). Para computá-la, introduz-se o conceito de *damping* viscoso ( $J$ ), ou coeficiente de amortecimento. Smith sugere os valores de 0,48 s/m para a ponta e 0,16 s/m para o atrito lateral. O programa GRLWEAP<sup>TM</sup> sugere 0,5 s/m para ponta, em qualquer tipo de solo; 0,16 s/m para fuste em solo não coesivo, e 0,65 para fuste em solo coesivo.

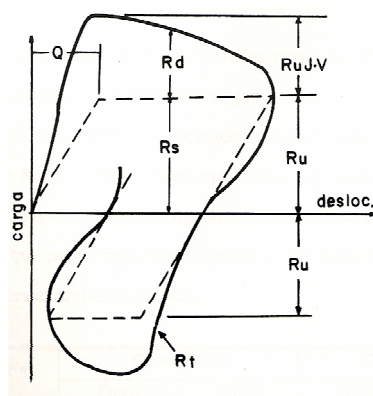


Figura 23 – Modelo do solo

Fonte: Kormann (1993)

O programa permite a escolha de diversos parâmetros de modelo do solo. Entre eles estão o *damping* de Smith, *damping* viscoso, *damping* de Case e o *damping* de Rausche. Cada um dos parâmetros tem uma abordagem diferente. O *damping* de Smith ( $J$ ) é dado de acordo com a Equação 23:

$$R_d = J \cdot R_s \cdot v \quad (23)$$

onde a resistência estática é dada pela Equação 24, para deslocamento,  $u$ , menor ou igual ao *quake* e, dada pela Equação 25, para o deslocamento igual ao *quake*:

$$R_s = \frac{u}{Q} \cdot R_u \quad \text{e} \quad R_s = R_u \quad (24) \text{ e } (25)$$

Segundo Smith (1960), a resistência mobilizada por *damping* é temporária e não contribui para a capacidade de carga.

### 2.3.2 Monitoração Dinâmica

A monitoração de qualquer empreendimento compreende as etapas de inspeção visual, utilização de métodos topográficos, registro e análise de dados advindos de uma instrumentação.

A inspeção visual é limitada em obras de fundação. De acordo com a ABNT NBR 6122:1996, a inspeção de estacas moldadas *in loco* deve ser realizada. O terreno ao redor das estacas deve ser escavado, abaixo da cota de arrasamento e, se possível, até o nível d'água, para verificação da integridade. Segundo Kormann (2002), ao contrário das peças que compõem a superestrutura, passíveis de inspeção visual direta, as fundações são acessíveis apenas ao longo de extensões limitadas.

Os métodos topográficos são utilizados no controle do recalque, que se constitui na avaliação do desempenho global da fundação. O controle de recalques permite avaliar a evolução dos mesmos ao longo do tempo, verificar se ocorrem

recalques diferenciais que possam comprometer a estrutura, bem como orientar trabalhos de eventuais reforços (Niyama *et al.*, 1998).

A utilização da instrumentação permite o acompanhamento do comportamento das estruturas e as verificações das hipóteses de projeto. Dados advindos de instrumentação permitem o registro de informações e eventos ocorridos durante a execução.

A monitoração dinâmica de estacas é efetuada utilizando-se um conjunto básico de instrumentos e equipamentos para a aquisição e tratamento dos dados, constituído pelo sistema de impacto, instrumentação e equipamento para aquisição dos dados (Gonçalves *et al.*, 2000).

A técnica de monitoração consiste no registro dos sinais de força e aceleração no topo da estaca, que são gravados em arquivos eletrônicos, podendo ser processados *on line* no momento da cravação, através de um analisador de cravação (Niyama *et al.*, 1982b). O analisador efetua uma série de cálculos, dentre eles o da capacidade de carga e das tensões de cravação, que podem ser refinados por uma análise numérica.

Nas seções seguintes serão descritas as principais fases do monitoramento: aquisição, registro, análise e interpretação dos dados advindos da instrumentação.

#### 2.3.2.1 Instrumentação: Aquisição de Dados

O ensaio de carregamento dinâmico é baseado no registro e na análise dos sinais de força e velocidade obtidos por instrumentação no topo da estaca.

Para obtenção das respostas dinâmicas são utilizados dispositivos que fornecem valores de deformação específica ou de força, e que fornecem valores de aceleração, velocidade ou deslocamento, todos em função do tempo em uma seção transversal específica da estaca (ABNT NBR 13208, 2007).

Usualmente, os instrumentos utilizados são transdutores de deformação e acelerômetros. As medidas de deformação podem ser convertidas em força, através da Lei de Hooke, considerando-se a área da seção transversal e o módulo de elasticidade dinâmico do material da estaca, na posição da instrumentação. As



medidas de velocidade podem ser obtidas através da integração do sinal registrado pelos acelerômetros (ABNT NBR 13208, 2007).

No mínimo quatro transdutores devem ser instalados, na mesma seção transversal, aos pares, em posições diametralmente opostas em relação ao eixo, de forma a detectar e compensar os efeitos originados da excentricidade do impacto, e a uma distância mínima de um diâmetro e meio do topo da estaca (Figura 24).

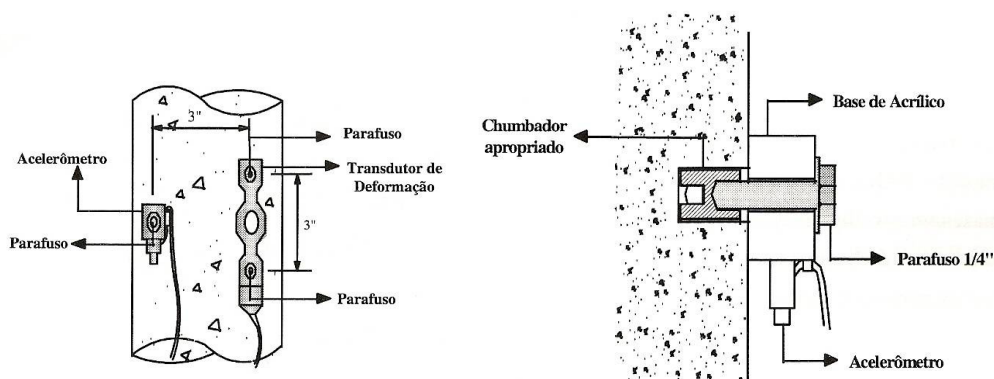


Figura 24 – Detalhes de instalação dos instrumentos

Fonte: Gonçalves *et al.* (1996)

A fixação dos transdutores deve ser efetuada de modo a impedir o deslocamento destes em relação à estaca durante o golpe, sem afetar suas características de funcionamento (ABNT NBR 13208, 2007). Para fixação dos parafusos nas estacas de concreto são instalados chumbadores de expansão. Em estacas tubulares metálicas são feitos furos com rosca. No caso de perfis metálicos, são realizados furos passantes e os parafusos são apertados através de porcas (PDI, 2008).

#### 2.3.2.2 Registro e Processamento

O ensaio de carregamento dinâmico é realizado através da monitoração da cravação de estacas com auxílio de um analisador de cravação de estacas. Este

equipamento adquire dados de sensores instalados no fuste, e processa estes sinais quando o elemento de fundação é impactado por um martelo.

Os sinais brutos obtidos pela instrumentação são transferidos através de um sistema de cabos de conexão a um equipamento eletrônico que realiza uma série de cálculos em tempo real, para cada golpe do martelo. Um sinal típico de força (F) e velocidade (V) pode ser visualizado na Figura 25.

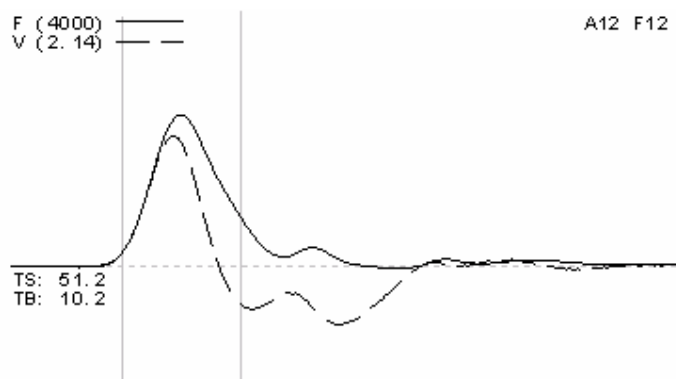


Figura 25 – Sinal típico registrado pelo PDA®

Fonte: In Situ (2005)

Os primeiros equipamentos do tipo PDA® possuíam um osciloscópio acoplado, utilizado para a visualização dos sinais de força e velocidade, um gravador de fita magnética, para o armazenamento e posterior análise dos sinais, e uma mini-impressora. As novas versões do equipamento dispensam a utilização destes periféricos, pois apresentam um microcomputador acoplado que permite a visualização dos sinais através de uma tela de cristal líquido e o imediato armazenamento e processamento dos dados.

Dois modelos deste equipamento são disponibilizados pela *Pile Dynamics, Inc.* (PDI, 2008). São eles: o modelo PAK, desenvolvido para enfrentar condições rigorosas de campo, e o PAX, que permite a transmissão remota de dados via internet (Figura 26).

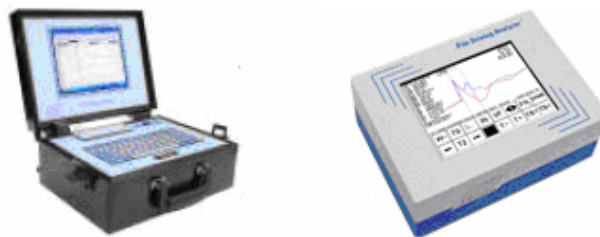


Figura 26 – Modelos PAK e PAX

Fonte: PDI (2008)

Quando efetuada durante um programa preliminar, a monitoração de estacas com auxílio do analisador de cravação, ajuda a estabelecer um critério de cravação. Durante a fase de execução, contribui para uma instalação segura e econômica.

#### 2.3.2.3 Análise e Interpretação

Segundo a ABNT NBR 13208:2007, para avaliação da capacidade de carga, têm-se as seguintes metodologias: o método simplificado do tipo CASE<sup>®</sup> e a análise numérica do tipo CAPWAP<sup>®</sup>.

Os sinais obtidos pela instrumentação, no momento do ensaio, são processados por meio do método simplificado do tipo CASE<sup>®</sup> - *Case Western Reserve Institute* (Goble *et al.*, 1980), que fornece para cada golpe transmitido à estaca as seguintes informações principais: carga mobilizada na interface solo-estaca; integridade estrutural; tensões dinâmicas máximas compressivas e de tração; deslocamento máximo; máxima energia transferida.

O cálculo da capacidade de carga estática é realizado com base nas medições de força e velocidade na cabeça da estaca, obtidos durante a cravação.

A resistência à penetração da estaca  $R$  é considerada como sendo igual à soma de duas parcelas: a resistência estática  $R_s$  e a resistência dinâmica  $R_d$  (Niyama *et al.*, 1982b).

Com base nos registros de força e velocidade obtidos para um determinado golpe durante a cravação, a resistência  $R$  é calculada pela seguinte expressão:

$$R = \frac{1}{2} \left\{ [F(t_1) + F(t_2)] + \frac{EA}{c} [V(t_1) - V(t_2)] \right\} \quad (26)$$

Onde  $t_2 = t_1 + 2L/c$  e  $t_1$  é um determinado instante durante o golpe, geralmente associado com o primeiro pico de força e velocidade (Niyama *et al.*, 1982b).

A resistência dinâmica é considerada proporcional à velocidade da ponta da estaca,  $V_p$ , ou seja:

$$R_d = J_c \cdot \frac{EA}{c} \cdot V_p \quad (27)$$

$J_c$  é a constante de amortecimento do método. Valores de  $J_c$  podem ser atribuídos ao tipo de solo, como no Quadro 1:

Tipo de Solo	$J_c$
Areia	0,05 a 0,15
Areia Siltosa	0,15 a 0,25
Silte Arenoso	0,25 a 0,40
Silte Argiloso	0,40 a 0,60
Argila	0,60 a 1,00

Quadro 1 – Valores de  $J_c$

Fonte: Gonçalves *et al.* (2000)

Uma análise simplificada por equação de onda permite obter  $V_p$  conhecidos  $V(t_1)$  e  $R$ , através da relação:

$$V_p = 2 \cdot V(t_1) - \frac{c}{EA} \cdot R \quad (28)$$

Substituindo-se na equação anterior, temos:

$$R_d = J_c \cdot \left[ 2 \cdot \frac{EA}{c} \cdot V(t_1) - R \right] \quad (29)$$

Como no instante  $t$  existe proporcionalidade entre força e velocidade de partícula, a expressão anterior pode ser reescrita da seguinte forma:

$$Rd = Jc \cdot [2 \cdot F(t_1) - R] \quad (30)$$

A capacidade de carga estática pode ser obtida calculando-se  $R$  e substituindo-se na expressão:

$$Ru = R - Jc \cdot [2F(t_1) - R] \quad (31)$$

Uma das inconveniências desse método é a escolha da constante de amortecimento que, segundo Niyama *et al.* (1982b), além do tipo de solo, depende das condições de cada local.

Rausche *et al.* (1985, *apud* Velloso e Lopes, 2002), enumeram as seguintes possibilidades de erro na determinação da capacidade de carga através do método CASE<sup>®</sup>:

- a capacidade de carga não ser totalmente mobilizada;
- a energia de impacto não ser suficiente para ativar as forças resistentes do solo;
- as forças resistentes não serem mantidas no seu valor total durante o tempo considerado;
- o valor da capacidade de carga variar com o tempo, por efeito *set-up* ou relaxação.

Por estas razões, os dados obtidos e processados pelo método simplificado do tipo CASE<sup>®</sup> devem ser confirmados e calibrados por meio de análise numérica do tipo CAPWAP<sup>®</sup>.

A análise numérica através do método CAPWAP<sup>®</sup> (*Case Pile Wave Analysis Program*) consiste em um método matemático que tem como objetivo o processamento dos registros de força e velocidade multiplicada pela impedância, previamente gravados no campo (ABNT NBR 13208, 2007).

Considera o sinal de velocidade de um golpe específico, com base em um modelo do solo e da estaca, permitindo calcular a curva de força em função do tempo na seção ao nível dos transdutores (ABNT NBR 13208, 2007).

O modelo do solo é então iterativamente aprimorado até que o melhor ajuste entre as curvas medida (Figura 27) e calculada seja obtido (ABNT NBR 13208, 2007).

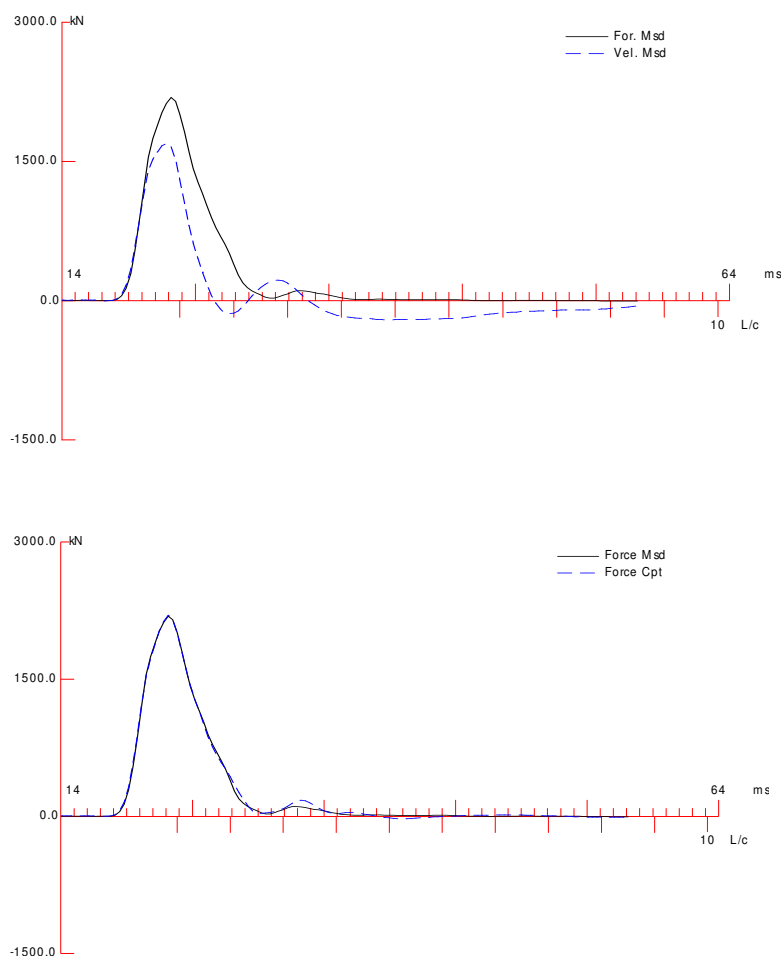


Figura 27 – Exemplo de ajuste das curvas medida e calculada

Fonte: In Situ (2005)

O modelo utilizado neste método se difere dos modelos de Equação da Onda no fato de não incluir o sistema de impacto e amortecimento. Tudo que existe acima dos sensores é excluído da análise (Goble e Rausche, 1979).

No modelo usado pelo CAPWAP<sup>®</sup>, considera-se o efeito da massa de solo que se desloca junto com a estaca. O amortecedor considera a resistência dinâmica, proporcional à velocidade, desse maciço de solo. Um valor zero significa

amortecimento infinito, ou seja, solo indeslocável em relação à estaca, abordagem do modelo de Smith tradicional (PDI, 2008).

As forças de reação do solo são consideradas como passivas e são expressas como função do movimento da estaca. A reação do solo é representada por componentes elasto-plásticos e visco-lineares (Gonçalves *et al.*, 1996).

O modelo admitido para o solo possui pra cada ponto três incógnitas: resistência estática limite, deformação elástica máxima (*quake*) e constantes de amortecimento (*damping*).

Durante o cálculo todos os parâmetros do solo são estimados e o movimento da estaca é simulado, podendo-se utilizar como condição de contorno a aceleração medida na seção instrumentada.

Esse processo fornece os deslocamentos de cada massa em que a estaca foi dividida, bem como valores da reação do solo. As forças calculadas no topo da estaca são comparadas com os valores medidos.

Segue-se um procedimento iterativo, repetindo-se todo o processamento e modificando-se os parâmetros do solo inicialmente assumidos, até que se obtenha convergência nos resultados, quando a iteração é interrompida e os parâmetros são considerados representativos do comportamento da estaca no golpe.

Como resultado obtém-se a previsão da carga mobilizada durante o golpe, bem como sua distribuição ao longo da profundidade.

### 2.3.3 Fatores que Influenciam as Análises

Alguns dos fatores que poderão influenciar na estimativa da capacidade de carga, a partir das medições efetuadas pelo processo dinâmico, são: energia aplicada durante a execução do ensaio, tempo de repouso da estaca após a cravação, variação entre os resultados das análises CAPWAP®, distribuição das resistências, parâmetros adotados em campo (Gonçalves *et al.*, 2000).

A energia de cravação aplicada pelo martelo deve ser suficiente para mobilizar toda resistência disponível no sistema interativo estaca-solo. A resistência mobilizada medida cresce de acordo com o incremento da energia aplicada, até que se atinja o valor limite de resistência do solo ou da estaca (Gonçalves *et al.*, 2000).

Quando se aplica uma energia inadequada não ocorre uma penetração suficiente da estaca no solo, não havendo assim, mobilização total do *quake* na ponta.

Durante a execução dos ensaios, costuma-se aplicar golpes de martelo com energias crescentes, com o intuito de verificar a tendência de saturação da resistência disponível no sistema iterativo estaca-solo. Tal metodologia faz-se condição indispensável nos casos em que são ensaiadas estacas muito longas, pois, um único golpe certamente não é suficiente para mobilizar a resistência distribuída ao longo de todo o fuste da estaca (Gonçalves *et al.*, 2000).

Os solos que apresentam características de resistência remoldadas ou reajustadas depois do processo de cravação, merecem cuidados especiais durante a determinação da capacidade de carga, através das medições dinâmicas. Alguns solos apresentam o fenômeno da relaxação, ou seja, perda da resistência em função do tempo decorrido após a cravação, ou o fenômeno da cicatrização, *set up*, que resulta no ganho de resistência no decorrer do tempo (Gonçalves *et al.*, 2000).

Tais comportamentos precisam ser avaliados durante a realização do ensaio através de instrumentações no final das cravações e durante as recravações. Com isso, pode-se aferir o comportamento do conjunto iterativo estaca-solo, de modo a refletir, o mais próximo possível as condições das solicitações estáticas a que a estaca será submetida em longo prazo (Gonçalves *et al.*, 2000).

Outro fator que causa variação nos resultados da avaliação da capacidade de carga é o fato da análise CAPWAP<sup>®</sup> ser efetuada sobre um golpe particular, dentre os inúmeros aplicados sobre a estaca. Assim sendo, escolhe-se um golpe cuja representatividade envolva as condições de cravação e penetração desejadas.

Em função do fato de a análise envolver um método iterativo, em que o ajuste das curvas é realizado manualmente, pode-se esperar que haja subjetividade na escolha dos alguns parâmetros (Gonçalves *et al.*, 2000). Danziger *et al.* (1996), discutem a unicidade das análises. Segundo os autores, a solução não é única e diferentes parâmetros podem produzir curvas de velocidades similares.

Quando se efetua o ensaio de carregamento dinâmico em campo, a estimativa da capacidade de carga é inicialmente efetuada através do método CASE<sup>®</sup>. O desenvolvimento físico-matemático para a avaliação das resistências dinâmicas e estáticas envolve uma série de parâmetros básicos, tais como a velocidade de propagação da onda e os coeficientes de amortecimento. A utilização inadequada de tais parâmetros interfere nos resultados (Gonçalves *et al.*, 2000).



#### 2.3.4 Aplicação em Estacas Moldadas *in Loco*

Segundo a ABNT NBR 13208:2007, os procedimentos de ensaio se aplicam às estacas moldadas *in loco* independentemente do processo construtivo. Os ensaios podem ser realizados após instalação no solo contados no mínimo sete dias.

Com a finalidade da absorção e amortecimento de impacto dinâmico e garantia da integridade estrutural da estaca a ensaiar, além dos sistemas de amortecimento convencionais necessários, deve-se atender a um dos seguintes procedimentos: execução de bloco de concreto armado com resistência superior ao concreto aplicado às estacas a ensaiar, armadura de fretagem próxima ao topo associada à armação principal de fuste, ou cintamento periférico através de camisa de aço (ABNT NBR 13208, 2007).

Em estacas cravadas, pode-se realizar o ensaio durante a cravação e/ou em uma re-cravação, após um período de repouso. Nesse caso, um sistema de cravação definido em projeto encontra-se disponível e pode ser utilizado na realização dos ensaios.

Já para estacas moldadas *in loco*, nas quais o ensaio deve ser realizado a partir de sete dias após a concretagem (ABNT NBR 13208, 2007), há a necessidade da seleção de um sistema de cravação.

Algumas recomendações para a seleção do sistema de impacto podem ser encontradas na literatura, como a de Hussein *et al.*, publicada no ano de 1996. No entanto, são aplicáveis em casos específicos.

O sistema de impacto é o responsável pela aplicação do carregamento axial na estaca. Ele deve apresentar energia potencial suficiente para provocar uma força de impacto capaz de gerar deslocamentos permanentes da ponta da estaca, e mobilizar as resistências das camadas de solo atravessadas pelo fuste (ABNT NBR 13208, 2007). Além disso, as tensões geradas pelo impacto não devem exceder as tensões estruturais limites.

O sucesso do ensaio de carregamento dinâmico em estacas moldadas *in loco* depende da seleção adequada do martelo, do sistema de amortecimento e da sequência dos golpes a serem utilizados.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 BANCO DE DADOS

No presente trabalho, um banco de dados foi desenvolvido a partir de informações contidas em relatórios de ensaios de carregamento dinâmico em estacas moldadas *in loco*. Para a organização e a montagem do mesmo foram considerados golpes de mobilização de maior resistência submetidos a uma análise numérica.

Os relatórios dos ensaios, cedidos pela empresa Fugro In Situ Geotecnia, contém informações de 140 estacas. Desse total, 90 foram selecionadas, as quais possuíam os golpes de maior mobilização de resistência analisados pelo método CAPWAP®.

Um resumo das principais informações obtidas para a montagem do banco de dados pode ser visualizado no Apêndice A.

Ele é composto por estacas do tipo hélice contínua (HC), raiz e escavadas, sem revestimento (ESR) e com auxílio de lama bentonítica (ELB). A maioria das estacas do banco de dados, 87 %, é do tipo hélice contínua.

São encontradas estacas com diâmetros de 30, 40, 50, 60, 65, 70, 80 e 140cm. As estacas de maior quantidade são as de 40 e 50 cm de diâmetro, representando 39 e 42 % das estacas, respectivamente.

O peso dos martelos utilizados nos ensaios de carregamento dinâmico varia entre 15 e 80 kN.

As alturas de queda nos golpes de obtenção da resistência máxima mobilizada variam entre 0,6 e 3,6 m.

Tensões de compressão variam entre 4,5 e 30,2 MPa, e de tração variam de 0,0 a 6,0 MPa.

A resistência máxima, que varia de 410 a 5685 kN, foi mobilizada com um número variável de golpes.

Nos dados provenientes de campo, em geral não havia informações precisas a respeito do sistema de amortecimento, em particular a geometria do cepo/coxim utilizados nos golpes.

Os ensaios de carregamento dinâmico em estacas moldadas *in loco*, cujos resultados foram utilizados nas análises deste estudo, possuem como principal objetivo a verificação da capacidade de carga e da integridade.

As estacas foram ensaiadas de acordo com as especificações das normas ABNT NBR 13208, ABNT NBR 6122 e ASTM D 45945.

Um bloco de reforço (Figura 28a), como sugerido na ABNT NBR 13208:2007, foi realizado em todos os casos analisados. O carregamento dinâmico foi aplicado após sete dias da concretagem.

Na realização dos ensaios foram utilizados sistemas de cravação dotados de bate-estacas com martelo de queda livre. O sistema de amortecimento variava de obra para obra e consistia basicamente na utilização de chapas de madeira compensada (Figura 28b).

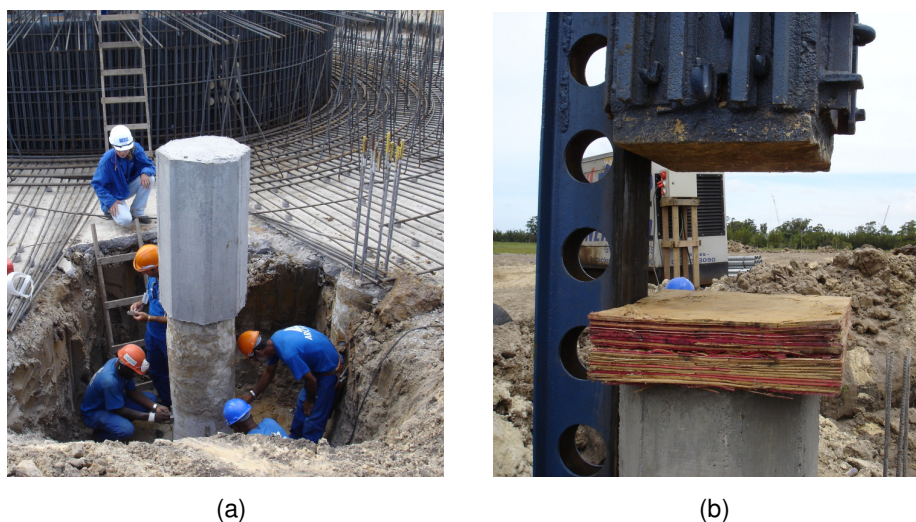


Figura 28 – Detalhes da execução do ECD em estacas moldadas *in loco*. a) Bloco de reforço; b) Chapas de madeira compensada para o amortecimento

A instrumentação consistiu na fixação de pares de transdutores de deformação específica e de pares de acelerômetros, instalados em posições diametralmente opostas.

Os sinais dos sensores foram monitorados e armazenados com um analisador de cravação de estacas tipo PDA<sup>®</sup>. Os dados eram transferidos para um computador, efetuando-se ajustes de velocidade de propagação da onda, análise de

integridade do elemento estrutural e avaliações da capacidade de suporte, através dos métodos CASE<sup>®</sup> e, para determinados golpes, CAPWAP<sup>®</sup>.

As análises CAPWAP<sup>®</sup> disponibilizam os sinais registrados em campo, a distribuição da resistência, força, tensões de compressão e tração, máxima energia transferida, velocidade e deslocamento de cada elemento do modelo, bem como os parâmetros *quake* e *damping*, lateral e de ponta. Um exemplo pode ser visualizado no Anexo.

Também são disponíveis os valores calculados pelo método CASE<sup>®</sup>, através do ajuste da constante de amortecimento, Jc. Entre eles: resistência estática, força máxima, deslocamento máximo e máxima energia transmitida.

Características da estaca, tais como a área de seção transversal, velocidade de onda, módulo de elasticidade, peso específico e impedância, também podem ser obtidas através do resultado de uma análise CAPWAP<sup>®</sup>.

Dados das obras a respeito de sondagens, carga de trabalho e fatores de segurança atingido nos ensaios se mostraram limitados.

### 3.2 SIMULAÇÕES COM A EQUAÇÃO DA ONDA

Diversas simulações de impacto do martelo e propagação de ondas de tensão sobre estacas foram realizadas neste trabalho.

Inicialmente realizou-se uma retro-análise dos parâmetros do modelo, com a finalidade de verificar as faixas representativas para as estacas pertencentes ao banco de dados. Nesta primeira etapa de simulações os sinais disponíveis nos relatórios foram simulados através do programa GRLWEAP<sup>TM</sup>. Isso possibilitou a determinação de valores representativos de eficiência do martelo, rigidez do amortecimento e coeficiente de restituição utilizados na prática.

Na etapa seguinte foi verificado o efeito destes parâmetros, bem como do peso do martelo e da altura de queda, sobre as simulações. Para isso, adotaram-se três estacas: curta, média e longa. Estas estacas modelo foram submetidas a diversas combinações dos parâmetros supracitados.

Em uma terceira etapa buscaram-se relações para a seleção do sistema de impacto e amortecimento para as estacas modelo. Os resultados de novas

simulações, realizadas a partir de diferentes combinações de parâmetros, foram observados. Consideraram-se satisfatórios os resultados em que a resistência última imposta foi mobilizada sem exceder as tensões estruturais limites.

As combinações que definiram o sistema de impacto e amortecimento na etapa anterior, cujos resultados obtidos foram satisfatórios, foram comparadas ao banco de dados. Com isso, puderam-se observar as relações que incidiram nos ensaios em estudo.

Por fim, os critérios definidos foram aplicados ao banco de dados e realizou-se a validação dos mesmos.

Em resumo, a Figura 29 ilustra a seqüência de etapas realizadas na pesquisa.

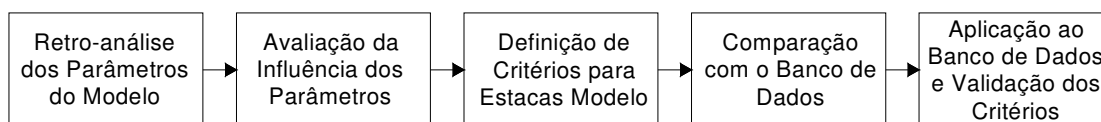


Figura 29 – Etapas da Pesquisa

A ferramenta computacional utilizada nas análises, GRLWEAP<sup>TM</sup>, envolve três modos operacionais, com diferentes objetivos:

- *Bearing Graph*: calcula o número de golpes, as tensões de tração e compressão, a energia transferida em cada elemento, entre outras informações, para até 10 valores de capacidade última com uma altura de queda fixa.
- *Inspector's Chart*: realiza os mesmos cálculos referentes ao *Bearing Graph*, para até 10 alturas de quedas diferentes e para uma dada resistência última.
- *Driveability Analysis*: permite obter o número de golpes pela penetração da estaca de até três valores de resistência última, definidos por fatores de ganho e perda de resistência.

Em todas as análises foi utilizado o modo *Bearing Graph*. Uma análise deste tipo necessita a especificação do modelo a ser utilizado e, como entrada das análises, dados do martelo, do amortecimento, da estaca e do solo.

### 3.2.1 Especificações do Modelo

Como citado no item 2.3.1.2, o programa GRLWEAP<sup>TM</sup> permite a seleção de diversos modelos e parâmetros para a realização das análises. Em todas as simulações realizadas nesta pesquisa fez-se uso do modelo original proposto por Smith (1960) com as modificações introduzidas no *software*.

Deve-se notar que os parâmetros de *damping* podem ser abordados de diferentes maneiras pelo programa. Em todas as análises fez-se uso do *damping* de Smith.

### 3.2.2 Dados do Martelo

Inicialmente, deve ser especificado o tipo de martelo a ser utilizado. De acordo com o exposto no item 2.3.1.2.2, em todas as análises foram utilizados o tipo ECH (*External Combustion Hammers*).

Os dados do martelo a serem inseridos são: peso, comprimento, diâmetro, número de segmentos, altura de queda e eficiência. Um único segmento foi adotado. A altura de queda, a eficiência e o peso foram variados de acordo com o foco da análise.

Para cada pilão modelado fez-se necessária a obtenção do comprimento e do diâmetro. Então, para cada peso pré-definido, um peso foi calculado a partir do volume de um cilindro e do peso específico do aço, adotado como sendo igual a 78,5 kN/m<sup>3</sup>. O peso calculado foi obtido iterativamente pela variação do comprimento e do diâmetro do pilão até o ajuste do peso.

### 3.2.3 Dados do Amortecimento

Os dados do amortecimento se referem a: área, módulo de elasticidade, espessura, coeficiente de restituição e rigidez do cepo e/ou do coxim.

Para a modelagem das chapas de madeira compensada, utilizadas como amortecimentos nos ensaios, foram considerados a rigidez e o coeficiente de restituição de um coxim.

O módulo de elasticidade, a área da seção transversal e a espessura do amortecimento não necessariamente devem ser inseridos quando se define um valor de rigidez. No entanto, em algumas etapas da pesquisa, fez-se necessária a obtenção da espessura ou da rigidez, que foram obtidas através da Equação 22, considerando-se a área ( $A_c$ ) como sendo a área de um quadrado de lado igual ao diâmetro nominal das estacas e o módulo de elasticidade ( $E_c$ ) igual a 207 MPa.

O parâmetro do modelo do amortecimento, *round-out*, foi adotado de acordo com o valor *default* do programa, igual a 3,0 mm.

### 3.2.4 Dados da Estaca

As informações referentes às estacas são: comprimento total, comprimento embutido, área da seção transversal, módulo de elasticidade, peso específico e a resistência do material da estaca. Todos esses dados foram inseridos no programa para cada simulação realizada, de acordo com as estacas estudadas (pertencentes ao banco de dados ou estacas modelo).

No modelo de Smith (1960) a estaca é representada como uma série de pesos e molas (Figura 18). O número de pesos e molas, bem como o comprimento de cada segmento da estaca, foi selecionado de acordo com as recomendações *default* do programa.

### 3.2.5 Dados do Solo

Os dados do solo referem-se basicamente a distribuição da resistência ao longo do fuste e a percentagem da resistência lateral. Utilizou-se uma distribuição de resistência uniforme ao longo do fuste. Segundo Kormann (1993), esta é uma simplificação válida para as análises.

Os valores de *quake* e *damping*, tradicionalmente referidos como parâmetros do solo, foram retirados dos relatórios do ensaio (para simulações cujo foco se constitui nas estacas pertencentes ao banco de dados) ou adotados com base no banco de dados (quando da simulação sobre as estacas modelo).

### 3.2.6 Resultados das Análises

As saídas das análises realizadas através do modo *Bearing Graph* constam de: gráficos do número de golpe *versus* resistência última e tensões de compressão e tração; sinais de força, velocidade, energia, etc., *versus* tempo; resultado dos cálculos para cada elemento da estaca.

Para as simulações realizadas na etapa da retro-análise, maior atenção foi dada aos sinais de força *versus* tempo. O conjunto de parâmetros utilizados para o ajuste dos sinais medidos e modelados (eficiência do martelo, rigidez e coeficiente de restituição do amortecimento), foi registrado.

Para as demais simulações foram registrados em planilhas Excel: o deslocamento, o número de golpes, a força máxima no topo da estaca, as máximas tensões de compressão e tração, a máxima energia transferida e a resistência mobilizada.



## 4 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

### 4.1 RETRO-ANÁLISE DOS PARÂMETROS DO MODELO

Com a finalidade de verificar as faixas representativas dos parâmetros do modelo para as estacas pertencentes ao banco de dados algumas características dos ensaios já realizados devem ser analisadas.

A eficiência do sistema pode ser obtida diretamente dos resultados dos ensaios, através da comparação entre a energia líquida transmitida à estaca e a energia potencial de cada golpe. Já os parâmetros de eficiência do martelo ( $\eta$ ) a rigidez ( $k$ ) e o coeficiente de restituição do amortecimento ( $e$ ) não são obtidos diretamente. Assim, para as 90 estacas pertencentes ao banco de dados esses parâmetros foram obtidos por retro-análise.

A eficiência do martelo pode ser definida como sendo a razão entre a energia cinética, no momento do impacto, e a energia potencial, em posição inicial. Ela poderia ser obtida através da Equação 21 e dos dados do PDA<sup>®</sup>, visto que o equipamento calcula a velocidade de impacto. Esse valor também pode ser obtido através da solução analítica para a onda de tensão inicial (Paikowsky, 2006). No entanto, essa alternativa foi descartada, pois os valores de eficiência encontrados foram relativamente altos, o que não condiz com a realidade dos martelos de queda livre utilizados no Brasil.

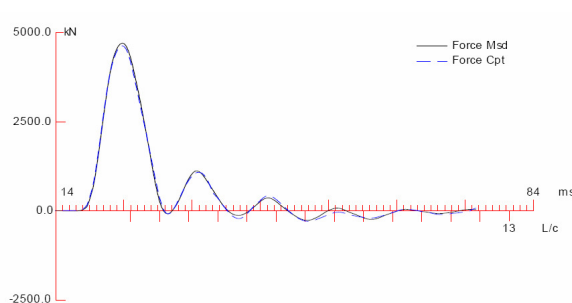
A solução analítica para a retro-análise da rigidez através do ajuste do tempo decorrido entre o impacto e o pico da força (Bernardes, 1989; Lowery *et al.*, 1969) foi testada, sem bons resultados. Em geral, a rigidez encontrada é alta e não se mostra consistente com o formato do sinal medido. Isto se deve ao fato de que os programas CAPWAP<sup>®</sup> e GRLWEAP<sup>™</sup> possuem modelos diferentes para a concepção do sinal de força e velocidade, como abordado nos itens 2.3.1.2 e 2.3.2.3.

Para a avaliação do coeficiente de restituição tem-se a proposição de Van Luipen e Jonker (1980), baseada no gradiente máximo de incremento do sinal de força e na parcela de energia transferida até o primeiro pico de força. Trata-se de um método trabalhoso em que se exige a interpretação gráfica dos sinais.

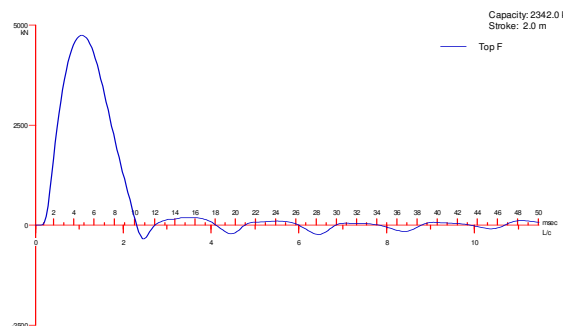
Por estas razões, foi realizado o ajuste dos sinais de força, anterior a chegada das ondas de tração, por tentativas através do programa GRLWEAP™. Segundo Kormann (1993), não é necessário o ajuste de todo o sinal, mas, do trecho inicial que é menos afetado pelas reflexões oriundas da resistência do solo e que corresponde ao pulso gerado pelo impacto do martelo.

Os parâmetros de eficiência do martelo, coeficiente de restituição e rigidez do amortecimento foram arbitrados até a coincidência dos sinais, disponíveis na análise CAPWAP®.

Os valores foram admitidos com base na obtenção da força máxima, nega e energia transmitida à estaca, de acordo com os resultados dos ensaios realizados. As Figuras 30, 31 e 32 exemplificam o ajuste dos sinais.



Sinal medido



Sinal ajustado

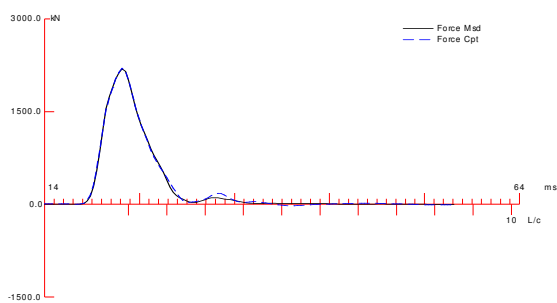
RMX (kN)	Nega (mm)	FMX (kN)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	EMX (kJ)
2342	4,0	4724,9	13,427	2,959	29,6

Resultados da análise CAPWAP®

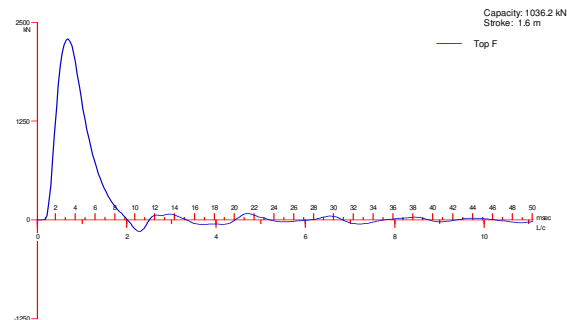
RMX (kN)	Nega (mm)	FMX (kN)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	EMX (kJ)
2342	3,99	4725,5	13,346	5,759	29,6

Resultados do ajuste

Figura 30 – Ajuste do sinal da estaca P19B, obra PEG 01



Sinal medido



Sinal ajustado

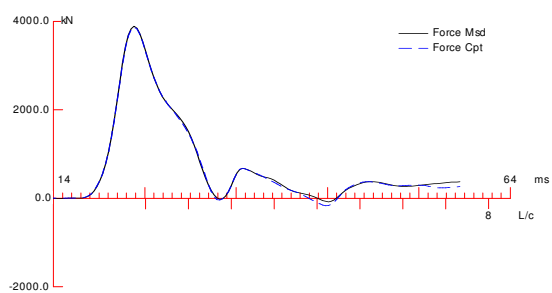
RMX (kN)	Nega (mm)	FMX (kN)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	EMX (kJ)
1036,2	3,0	2278,5	14,33	0,941	9,6

Resultados da análise CAPWAP®

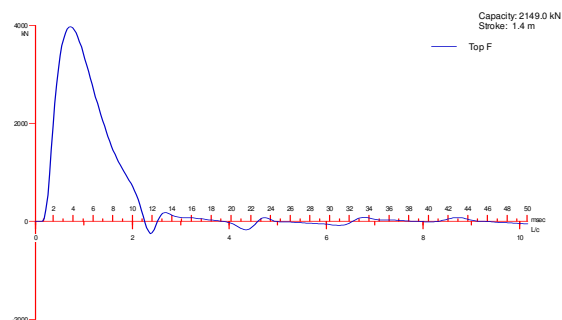
RMX (kN)	Nega (mm)	FMX (kN)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	EMX (kJ)
1036	2,99	2278,2	14,919	3,652	9,5

Resultados do ajuste

Figura 31 – Ajuste do Sinal da estaca E08, obra RGT01



Sinal medido



Sinal ajustado

RMX (kN)	Nega (mm)	FMX (kN)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	EMX (kJ)
2149	4,0	3951,5	19,351	2,002	30,0

Resultados da análise CAPWAP®

RMX (kN)	Nega (mm)	FMX (kN)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	EMX (kJ)
2149	4,94	3951,2	19,723	6,854	30,0

Resultados do ajuste

Figura 32 – Ajuste do Sinal da estaca E066, obra GEF02

Inicialmente o banco de dados era composto por 140 estacas. Parte das estacas, 34, não teve o golpe de mobilização da maior resistência submetido a uma análise CAPWAP®, por esta razão não foram utilizados. Outra parte, 16 estacas, ao decorrer desta etapa do trabalho, também foi desconsiderada. Houve dificuldade no ajuste dos sinais medidos em campo, devido a variações de impedância ou por não se atingir a força máxima, nega e energia transferida.

A eficiência do martelo ( $\eta$ ), a rigidez ( $k$ ) e o coeficiente de restituição do amortecimento ( $e$ ) foram obtidos através da retro-análise dos resultados dos ensaios de carregamento dinâmico. A eficiência do sistema foi calculada a partir da energia transmitida. Os resultados estão dispostos no Quadro 2.

Os valores de eficiência do martelo, parâmetro do modelo que influencia diretamente nos valores de nega, variam entre 20 e 98 %, com média de 48 %, desvio padrão de 16 %, e, mediana igual a 46 %. Convém ressaltar que valores acima de 80 % não são realistas.

A Figura 33 mostra o histograma de frequência relativa obtido para os valores de eficiência do martelo.

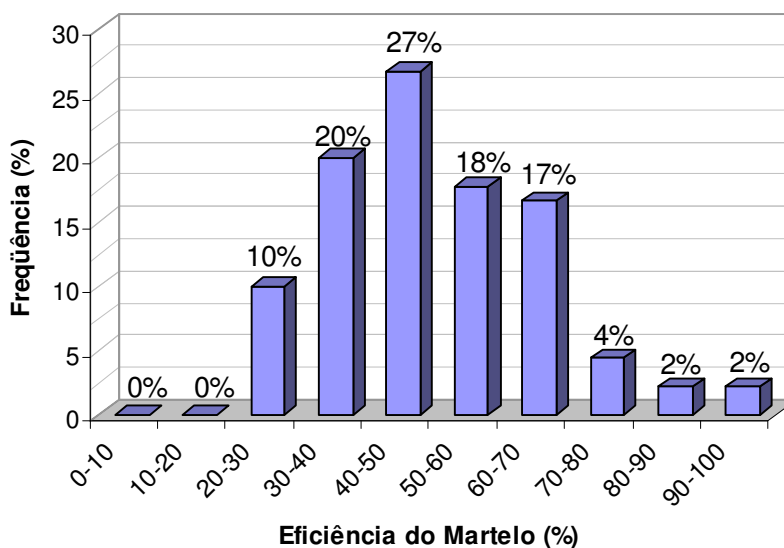


Figura 33 – Histograma de frequência relativa da eficiência do martelo

Os valores entre 30 e 65%, aproximadamente média mais e menos o desvio padrão, correspondem a 79% dos casos e foram considerados representativos.

Estaca	D (cm)	W (kN)	H (m)	L (m)	Ep (kNm)	EMX (kJ)	Eficiência do Sistema (%)	$\eta$ (%)	k (kN/mm)	e
E03/OAG02	50	40,5	2,4	23,0	97,2	22,7	23	33	610	0,1
E32/OAG06	50	40,5	3,4	21,6	137,7	42,4	31	42	470	0,9
E32/OAG07	50	40,5	2,8	14,5	113,4	43,2	38	48	352	0,8
E29/OAG10	50	50	3,2	22,5	160,0	56,8	36	56	585	0,9
E08/OAG11	50	50	3,2	23,4	160,0	63,3	40	70	358	0,9
E31/OAG12	50	50	3,2	23,5	160,0	47,5	30	48	302	0,9
E10/OAG18	50	50	1,8	12,7	90,0	40,4	45	58	331	0,7
TEB/OAG18	50	50,5	2,2	14,7	111,1	50,7	46	65	299	0,7
TE/OAG19	50	40,5	1,8	24,6	72,9	35,1	48	60	665	0,7
TE/OAG20	50	40,5	2,0	14,5	81,0	16,8	21	38	580	0,2
TE/OAG21	50	40,5	3,6	19,5	145,8	35,6	24	45	212	0,9
TE/OAG22	50	40,5	2,6	19,6	105,3	37,7	36	45	850	0,7
E21/OAG01	50	50	2,0	22,5	100,0	24,3	24	33	1063	0,1
TE/OAG05	50	50	2,0	14,2	100,0	39,5	40	50	417	0,6
E9a - oeste	30	22	1,8	11,5	39,6	11,2	28	50	295	0,8
E0019	40	31	1,2	18,8	37,2	20,5	55	89	894	0,2
E0031	40	31	1,5	20,8	46,5	27,6	59	81	910	0,5
E0231	40	31	1,5	18,4	46,5	18,9	41	43	2345	0,1
E0246	40	31	1,1	18,3	34,1	18,3	54	60	4150	0,5
E0435	40	31	1,5	18,6	46,5	25,9	56	65	2025	0,3
E0535	40	31	1,2	20,6	37,2	18,5	50	56	2860	0,2
E0624	40	31	1,7	20,5	52,7	26,5	50	60	490	0,6
E0631	40	31	1,3	20,5	40,3	17,3	43	48	2800	0,2
E0647	60	51	1,8	17,4	91,8	14,0	15	27	814	0,8
E0674	60	51	2,0	18,7	102,0	16,5	16	24	835	0,1
E0720	40	31	1,4	20,3	43,4	19,0	44	52	2170	0,5
E0725	40	31	1,7	19,4	52,7	14,1	27	33	609	0,1
E0744	40	31	1,1	18,6	34,1	8,5	25	31	1080	0,2
E0773	40	31	1,5	19,6	46,5	24,2	52	61	1420	0,1
E0778	40	31	0,9	18,1	27,9	22,8	82	90	1045	0,4
E0896	40	31	1,2	20,6	37,2	21,3	57	63	2560	0,1
E0926	40	31	0,7	19,6	21,7	13,0	60	67	1840	0,2
E1076	40	31	0,9	21,2	27,9	17,2	62	71	4530	0,5
E1200	40	31	1,0	20,6	31,0	18,7	60	74	2390	0,2
E1251	50	31	1,5	19,9	46,5	25,7	55	63	2070	0,3
E1297	40	31	1,0	21,4	31,0	17,1	55	64	4800	0,5
E1636	50	51	1,1	19,2	56,1	30,5	54	60	4200	0,5
E1693	60	51	1,7	21,3	86,7	32,0	37	45	2600	0,1
E1910	50	51	1,4	20,1	71,4	14,2	20	32	3650	0,5
E2000	40	31	1,8	18,1	55,8	14,1	25	28	778	0,1
E2136	50	51	1,7	18,4	86,7	16,2	19	27	1420	0,5
E4456	40	31	1,5	16,7	46,5	8,7	19	30	464	0,5
E-1983	30	20	1,4	10,1	28,0	10,7	38	44	207	0,7
P338	40	16	1,2	24,0	19,2	4,0	21	41	760	0,5
P21QA	80	80	2,8	23,0	224,0	74,1	33	50	572	0,7
P23JA	80	80	2,8	22,5	220,0	42,6	19	40	374	0,3
E009	60	39,5	2,5	16,0	98,8	21,5	22	29	1075	0,3
E017	50	39,5	2,0	15,2	79,0	35,1	44	50	975	0,7
E045	50	39,5	1,6	17,4	63,2	27,6	44	49	1790	0,2
E051	50	39,5	1,8	16,6	71,1	35,3	50	55	2250	0,2

Estaca	D (cm)	W (kN)	H (m)	L (m)	Ep (kNm)	EMX (kJ)	Eficiência do Sistema (%)	$\eta$ (%)	k (kN/mm)	e
E058	50	39,5	1,4	16,6	55,3	34,5	62	68	1740	0,6
E066	50	39,5	1,4	16,7	55,3	30,0	54	60	1214	0,9
E071	50	39,5	1,8	17,1	71,1	25,7	36	41	1255	0,6
E076	40	39,5	0,8	16,1	31,6	7,9	25	60	190	0,8
E077	50	39,5	2,2	16,8	86,9	38,1	44	49	698	0,9
E079	50	39,5	1,4	18,9	55,3	24,5	44	50	758	0,8
E084	60	39,5	2,0	17,1	79,0	31,2	39	50	1515	0,2
E088	40	39,5	0,6	10,7	23,7	22,3	94	98	1290	0,6
BT12A-A	50	23	2,6	12,5	59,8	17,4	29	38	784	0,8
E-08	40	15	1,4	11,8	21,0	2,9	14	20	254	0,9
E-54	50	15	1,0	11,4	15,0	3,4	23	30	915	0,5
E-82	50	30	0,6	11,4	18,0	4,5	25	45	116	0,4
E-85	50	30	0,8	11,1	24,0	5,7	24	31	230	0,9
E-108	70	30	1,0	12,4	30,0	8,8	29	38	1515	0,8
P71	140	80	2,4	12,8	192,0	27,0	14	43	697	0,8
P72	140	80	2,4	10,0	192,0	24,8	13	31	823	0,8
P-2A	65	50	2,0	14,8	100,0	22,5	23	33	843	0,2
P-19B	65	50	2,0	14,8	100,0	29,6	30	38	803	0,8
P-24I	65	50	2,2	14,8	110,0	23,1	21	28	877	0,8
E08	40	16	1,6	14,4	25,6	9,6	38	44	955	0,8
E32	40	16	0,8	14,3	12,8	4,6	36	42	1065	0,4
E33	40	16	1,6	14,3	25,6	8,4	33	39	880	0,6
E36	40	16	0,8	14,7	12,8	6,1	48	75	1030	0,2
E41	40	16	1,0	14,7	16,0	7,6	48	54	5800	0,2
E70	40	16	1,6	14,4	25,6	7,2	28	50	705	0,3
E71	40	16	1,2	14,5	19,2	5,1	27	45	440	0,8
E73	40	16	1,6	14,6	25,6	7,2	28	38	630	0,2
E74	40	16	1,8	14,2	28,8	6,5	23	45	215	0,4
E75	40	16	1,7	14,3	27,2	8,3	31	58	223	0,1
E87	40	16	1,4	14,3	22,4	7,9	35	41	2000	0,1
E-115	50	31	1,3	16,4	38,8	12,8	33	40	872	0,8
E03	60	20	2,4	8,0	48,0	7,4	15	25	647	0,8
E18	60	20	2,2	7,5	44,0	11,0	25	45	994	0,3
E24	50	20	1,6	9,5	32,0	6,8	21	35	576	0,2
E25	50	20	1,2	9,0	24,0	6,8	28	53	714	0,3
E61	50	35	0,6	23,5	21,0	3,8	18	30	466	0,1
E68	50	35	1,4	23,5	49,0	11,2	23	29	856	0,1
E187	50	35	0,6	19,5	21,0	5,4	26	48	1150	0,8
F3	50	36	1,2	12,6	43,2	19,5	45	60	700	0,1
F4	50	36	0,8	6,6	28,8	13,6	47	58	128	0,7

Máximo	140	80	3,6	24,6	224,0	74,1	94	98	5800	0,9
Mínimo	30	15	0,6	6,6	12,8	2,9	13	20	116	0,1
Média	50	36	1,7	16,8	63,6	21,1	36	48	1208	0,5
Desv. Pad.	16	15	0,7	4,2	47,7	14,3	16	16	1116	0,3
Mediana	50	31	1,6	16,9	46,5	18,6	34	47	847	0,5

Quadro 2 – Resultado do Ajuste dos Sinais

A eficiência do sistema de cravação é dada pela relação entre a energia potencial e a energia líquida transferida à estaca. Verifica-se que os valores de eficiência do sistema, variam entre 13 e 62%, tendo-se desconsiderando os valores de 82 e 94 % que se mostraram excepcionais. A média resultou em 35%, o desvio padrão 14% e a mediana 33% (Figura 34).

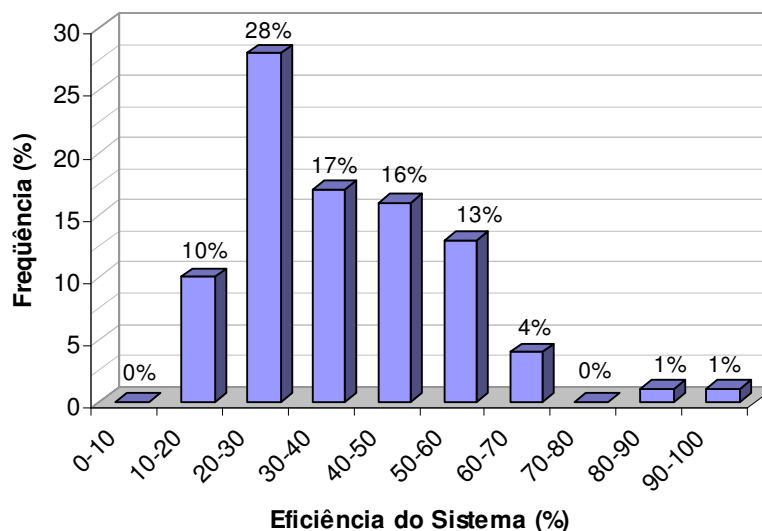


Figura 34 – Histograma de frequência relativa da eficiência do sistema

Valores compreendidos entre 20 e 50%, aproximadamente a média mais e menos o desvio padrão, correspondem a 61% dos casos e foram considerados representativos.

Os valores observados mostram que, para o último golpe, a eficiência do martelo obtida é, em média, cerca de 10 a 12% superior à eficiência do sistema.

A rigidez do amortecimento varia entre 116 e 5800 kN/mm, possuindo um valor médio de 1208 kN/mm e mediana igual a 847 kN/mm. Na Figura 35, tem-se o histograma de frequências relativas obtido para este parâmetro.

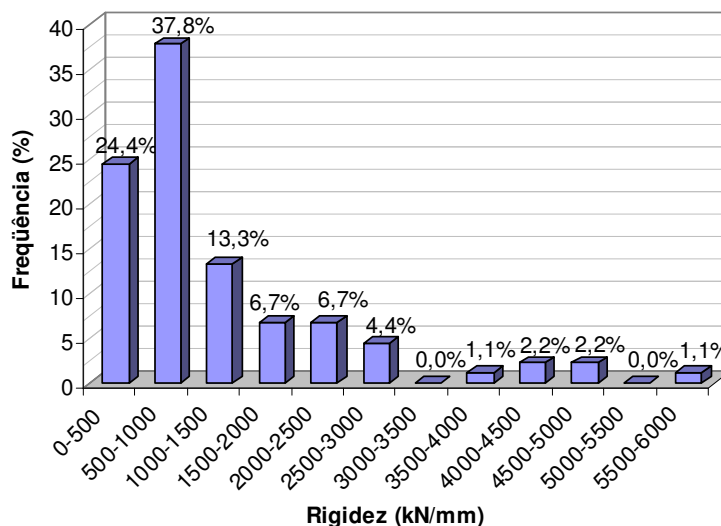


Figura 35 – Histograma de frequência relativa da rigidez do amortecimento

Os valores encontrados são inferiores a 1200 kN/mm em 70% dos casos. Por esta razão, essa rigidez foi considerada como limite superior da rigidez na etapa seguinte de análise.

O coeficiente de restituição varia de 0,1 a 0,9, com média de 0,5 e desvio padrão de 0,3. O histograma de frequência relativa obtido para o coeficiente pode ser observado na Figura 36.

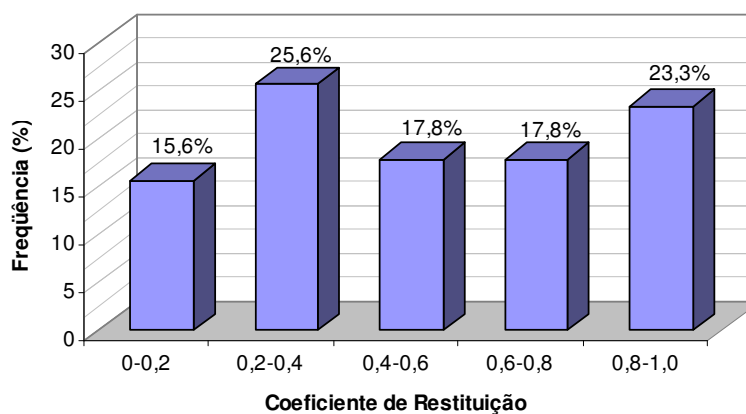


Figura 36 – Histograma de frequência relativa do coeficiente de restituição

Por não apresentar tendência clara, o valor médio, condizente com o valor sugerido na literatura para amortecimento composto por madeira (PDI, 2003), igual a 0,5, foi utilizado nas análises subseqüentes.



## 4.2 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS

A fim de definir características do sistema de impacto e amortecimento que mobilizem a resistência última e não excedam as tensões estruturais limites, a influência dos parâmetros a serem selecionados deve ser estudada.

Através dos intervalos de eficiência do martelo, rigidez do amortecimento e alturas de queda, observados nas análises precedentes, três estacas modelo foram submetidas a diversas simulações.

As estacas pertencentes ao banco de dados foram divididas em três categorias: curta, média e longa. Sendo assim consideradas de acordo com a relação  $L/D$ : curta,  $L/D$  menor que 30; média,  $L/D$  entre 30 e 45; longa,  $L/D$  maior que 45. Esses valores foram definidos com base no banco de dados.

Os valores médios de comprimento e diâmetro de cada categoria definiram a geometria de três estacas modelo. Um resumo de suas características pode ser visualizado no Quadro 3.

Estaca	L (m)	D (cm)	$L/D$
Curta	9	60	15
Média	15	50	30
Longa	20	40	50

Quadro 3 – Características das estacas modelo

Os dados necessários para a realização das análises, ou seja, de capacidade de carga, módulo de elasticidade, peso específico, *quake* lateral e de ponta, *damping* lateral e de ponta, bem como a distribuição das resistências, foram assumidos de acordo com as estacas mais usuais, segundo o banco de dados.

Não foi considerado um determinado tipo de solo na concepção das estacas. Segundo Paikowsky e Chernauskas (1996), não existe correlação entre os parâmetros utilizados para a descrição do solo no modelo e as condições físicas reais, ou seja, o tipo de solo. Isso pode ser constatado no próprio banco de dados, entre estacas de mesma obra. No entanto, é de praxe referir-se a estes parâmetros como dados do solo.

Para as simulações efetuadas sobre as três estacas adotadas foram variados:

- Os pesos do martelo ( $W$ ), definidos a partir do peso da estaca ( $W_p$ ), variando de  $0,1 W_p$  a  $1,0 W_p$ , de acordo com o Quadro 4.

Estaca	Curta		Média		Longa	
$W/W_p$	$W_p$ (kN)	$W$ (kN)	$W_p$ (kN)	$W$ (kN)	$W_p$ (kN)	$W$ (kN)
0,1	61,1	6,1	70,7	7,1	60,3	6,0
0,2	61,1	12,2	70,7	14,1	60,3	12,1
0,3	61,1	18,3	70,7	21,2	60,3	18,1
0,4	61,1	24,4	70,7	28,3	60,3	24,1
0,5	61,1	30,5	70,7	35,3	60,3	30,2
0,6	61,1	36,6	70,7	42,4	60,3	36,2
0,7	61,1	42,7	70,7	49,5	60,3	42,2
0,8	61,1	48,9	70,7	56,5	60,3	48,3
0,9	61,1	55,0	70,7	63,6	60,3	54,3
1,0	61,1	61,1	70,7	70,7	60,3	60,3

Quadro 4 – Martelos utilizados nas análises

- As eficiências do martelo ( $\eta$ ), definidas a partir das análises anteriores, considerando-se como baixa o valor de 30 % e alta o valor de 65 %.
- A rigidez do amortecimento ( $k$ ), considerando-se um limite inferior, variando de estaca para estaca, e, um limite superior de 1200 kN/mm determinado a partir do ajuste dos sinais.
- As resistências, definidas de acordo com o banco de dados, assumindo-se três valores para cada estaca (Quadro 5), cuja escolha foi baseada nos valores médios encontrados para as categorias curta, média e longa, e na capacidade estrutural.

Estaca	$Ru_1$ (kN)	$Ru_2$ (kN)	$Ru_3$ (kN)
Curta	1000	2000	3000
Média	800	1800	2800
Longa	600	1600	2600

Quadro 5 – Resistências últimas impostas nas simulações

- As alturas de queda ( $H$ ), definidas de acordo com o banco de dados, variando 0,5 a 3,0 m.

Os parâmetros de entrada das análises que não sofreram modificações durante as análises foram os dados das estacas, os parâmetros do solo e o coeficiente de restituição (considerado igual a 0,5).

Um resumo dos dados de entrada das análises para as simulações das diversas combinações pode ser visualizado no Quadro 6.

Dados das Simulações	Estaca		
	Curta	Média	Longa
Características da Estaca			
L (m)	9,0	15,0	20,0
D (m)	60	50	40
L/D	15	30	50
Wp (kN)	61,1	70,7	60,3
Dados do Martelo			
Peso (kN)	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 e 1,0 Wp		
Altura	Ajustada para cada peso		
Diâmetro	Ajustado para cada peso		
Altura de queda (m)	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0		
Eficiência (%)	Baixa (30%) e Alta (65%)		
Dados do Amortecimento			
C.O.R.	0,5	0,5	0,5
Rigidez (kN/mm)	100 e 1200	80 e 1200	50 e 1200
Dados da Estaca			
Comprimento (m)	9	15	20
Penetração (m)	8	14	19
Área (cm²)	2827	1963	1257
Módulo de Elasticidade (MPa)	25500	25500	25500
Peso Específico (kN/m³)	24	24	24
fck (MPa)	20	20	20
Dados do Solo			
Quake Lateral (mm)	2,5	2,4	1,0
Quake de Ponta (mm)	3,0	5,0	3,0
Damping Lateral (s/m)	1,0	0,8	0,3
Damping de Ponta (s/m)	1,0	0,8	0,8
RI/Ru (%)	60	70	60

Quadro 6 – Entrada das simulações

Os resultados são gerados no GRLWEAP<sup>TM</sup> de acordo com o peso e eficiência do martelo, altura de queda e rigidez. Desta forma, foram separados em quatro grupos, por eficiência do martelo e rigidez do amortecimento. Os quatro grupos gerados para cada estaca, em resumo, são:

- Baixa eficiência do martelo e baixa rigidez do amortecimento;
- Baixa eficiência do martelo e alta rigidez do amortecimento;
- Alta eficiência do martelo e baixa rigidez do amortecimento;
- Alta eficiência do martelo e alta rigidez do amortecimento.

Dentro de cada grupo fez-se variar o peso do martelo, as alturas de queda e o valor das resistências, obtendo-se para cada simulação os resultados das três resistências ao mesmo tempo.

Os resultados das análises, em resumo, são: a resistência mobilizada, a energia transmitida, as tensões de compressão e tração, o número de golpes por metros ou nega. Estas informações foram transferidas para planilhas Excel, com a finalidade de facilitar a visualização e a comparação entre os resultados.

A eficiência do sistema, relação entre a energia potencial e a energia líquida transferida à estaca, foi calculada para cada simulação.

Em síntese, gerou-se para cada estaca quatro planilhas, cada uma delas contendo os resultados de dez martelos e seis alturas de queda analisadas para cada martelo. Os resultados podem ser verificados no Apêndice B.

Essas combinações foram assumidas a fim de traduzir as diversas condições que podem vir a ocorrer em campo, abrangendo: martelos dos mais leves aos mais pesados, alturas de queda das menores até as maiores, baixa e alta eficiência do martelo, baixa e alta rigidez do amortecimento.

Em alguns casos, obteve-se um bom resultado, mesmo sob condições críticas de rigidez e eficiência. Um resultado foi considerado satisfatório quando as resistências impostas foram mobilizadas para as combinações e para qualquer altura de queda, sem exceder as tensões estruturais limites usuais na prática.

Para as tensões de compressão, a tensão estrutural limite foi considerada de 20 MPa, sendo esta a resistência característica do concreto a ser utilizado na execução das estacas em estudo, de acordo com a norma ABNT NBR 6122:1996. Já para as tensões de tração foi considerada 2 MPa, de acordo com a resistência à tração do concreto, definida a partir das prescrições da ABNT NBR 6118:2003. Não foi considerada a resistência de armaduras.

Os Quadros 7, 8 e 9 mostram o resumo dos resultados satisfatórios, evidenciando os pesos de martelo utilizados.

Ru (kN)	Relação entre o peso do martelo e da estaca									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1000						X	X	X	X	X
2000				X	X	X	X	X	X	X
3000					X	X	X	X	X	X

Quadro 7 – Resultados satisfatórios para a estaca curta

Ru (kN)	Relação entre o peso do martelo e da estaca									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
800									X	X
1800						X	X	X	X	X
2800							X	X		

Quadro 8 – Resultados satisfatórios para a estaca média

Ru (kN)	Relação entre o peso do martelo e da estaca									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
600										X
1600					X	X	X	X	X	X
2600						X	X	X	X	X

Quadro 9 – Resultados satisfatórios para a estaca longa

Os martelos cujas relações entre o seu peso e o peso da estaca resultaram entre 0,6 e 1,0 mostram-se mais satisfatórios para a mobilização da resistência média.

Enfatizando as alturas de queda, os resultados satisfatórios compreendem um intervalo que varia de 1,0 a 2,5m. A altura de queda de 0,5m, na maioria dos casos, não mobiliza a resistência estabelecida. Já a altura de 3,0m, na maioria dos casos, indica tensões excessivas.

Com relação à rigidez, quando baixa, associada à baixa eficiência do martelo, tende a não mobilizar as resistências esperadas; quando alta, em conjunto com elevada eficiência, pode provocar danos por tensões de tração. Como não se

pode controlar a eficiência do martelo em campo, é preferível uma rigidez intermediária, visto que é possível manipulá-la através da espessura do amortecimento.

Quanto à influência dos parâmetros nos resultados, observa-se que as tensões de compressão aumentam com o aumento do peso do martelo, com o aumento da altura de queda, com o aumento da rigidez e da eficiência do martelo.

Estas influências foram exemplificadas com a estaca média para a resistência última de 1800 kN. A Figura 37 mostra o aumento da tensão de compressão com o aumento do peso do martelo, para a altura de queda de 2,0 m.

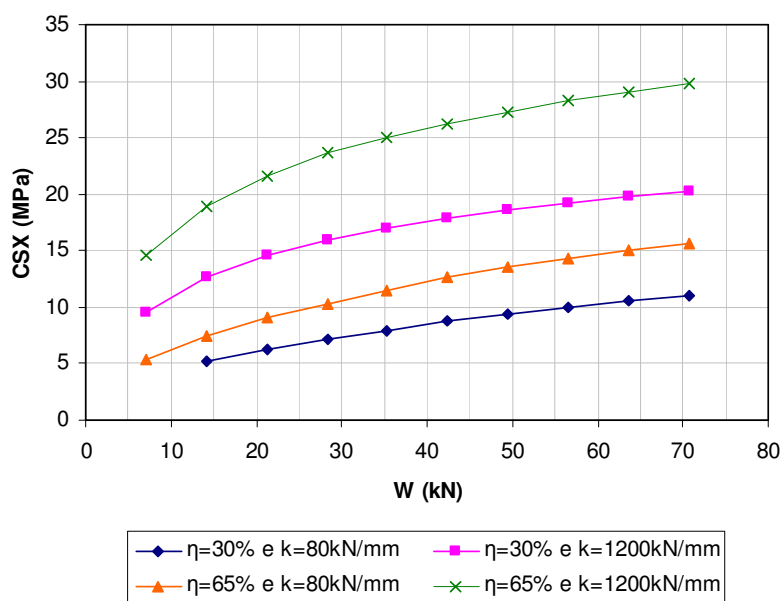


Figura 37 – Tensões de compressão *versus* peso do martelo

Na Figura 38 pode-se verificar o aumento da tensão de compressão com a altura de queda, para o martelo de 35,3 kN. Em ambas as ilustrações pode-se verificar a influência da rigidez.

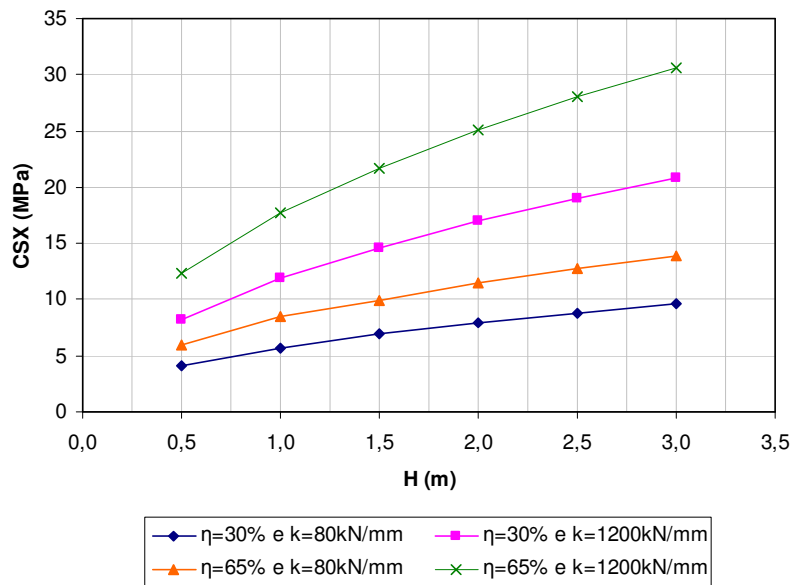


Figura 38 – Tensões de compressão *versus* altura de queda

Com relação às tensões de tração, as mesmas tendem a diminuir com o aumento do peso do martelo, a aumentar com o aumento da altura de queda e a aumentar com o aumento da rigidez.

As influências foram exemplificadas com a estaca média para a resistência última de 1800 kN. A Figura 39 mostra a diminuição da tensão de tração com o aumento do peso do martelo, para a altura de queda de 2,0m.

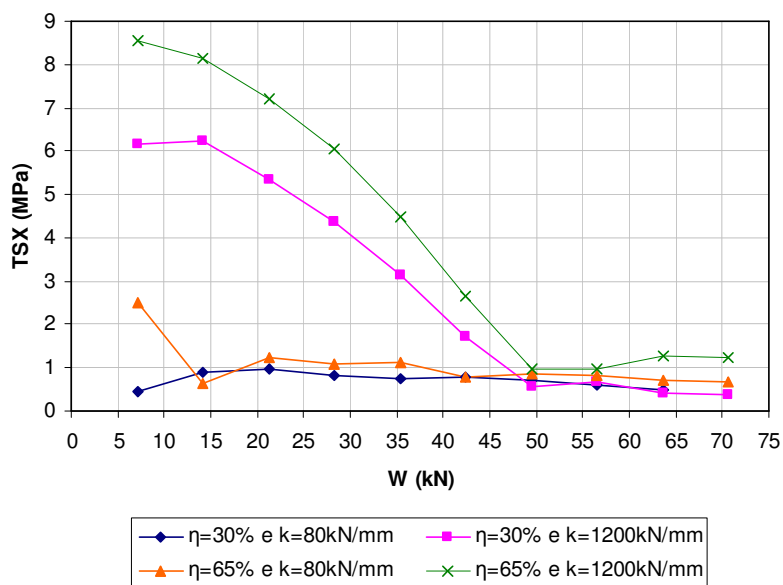


Figura 39 – Tensões de tração *versus* peso do martelo

Esse comportamento se deve ao fato de que, como visto anteriormente, os martelos de relação  $W/W_p$  variando de 0,6 a 1,0, em geral mobilizam a resistência imposta. A parcela de resistência devida ao atrito lateral, quando mobilizada, de acordo com o exposto no item 2.3.1.1, tende a absorver a energia e, conseqüentemente, as tensões provocadas pelo golpe.

Na Figura 40 pode-se verificar o aumento da tensão de tração com a altura de queda, para o martelo de 35,3 kN. Em ambas as ilustrações pode-se verificar a influência da rigidez.

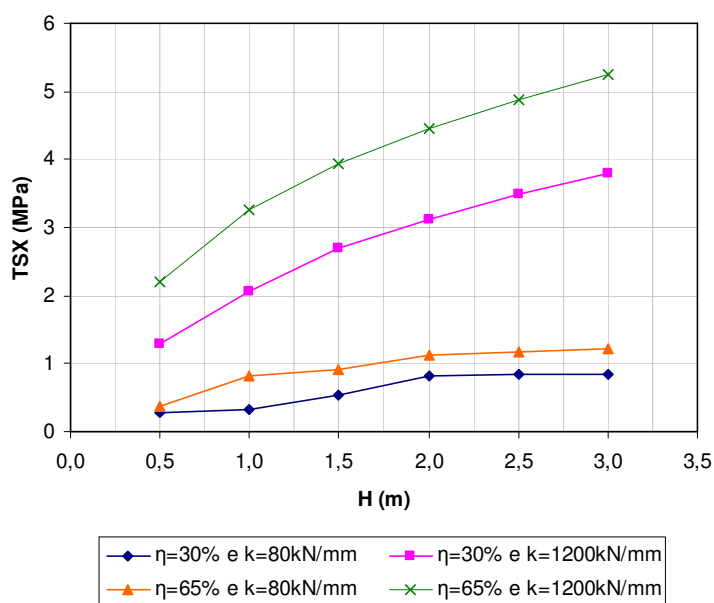


Figura 40 – Tensões de tração *versus* altura de queda

Através dos resultados obtidos pode-se verificar a grande influência da rigidez do amortecimento sobre as tensões impostas às estacas, que, na maioria dos casos, supera o efeito da eficiência do martelo.

Observa-se também, a importância do peso do martelo na mobilização das resistências.

Verifica-se que a mobilização das resistências ocorre a partir de um dado valor de energia máxima transmitida. Isso pode ser visualizado na Figura 41, onde se tem a resistência mobilizada *versus* energia máxima transmitida ao sistema, para a estaca média e resistência imposta de 1800 kN.



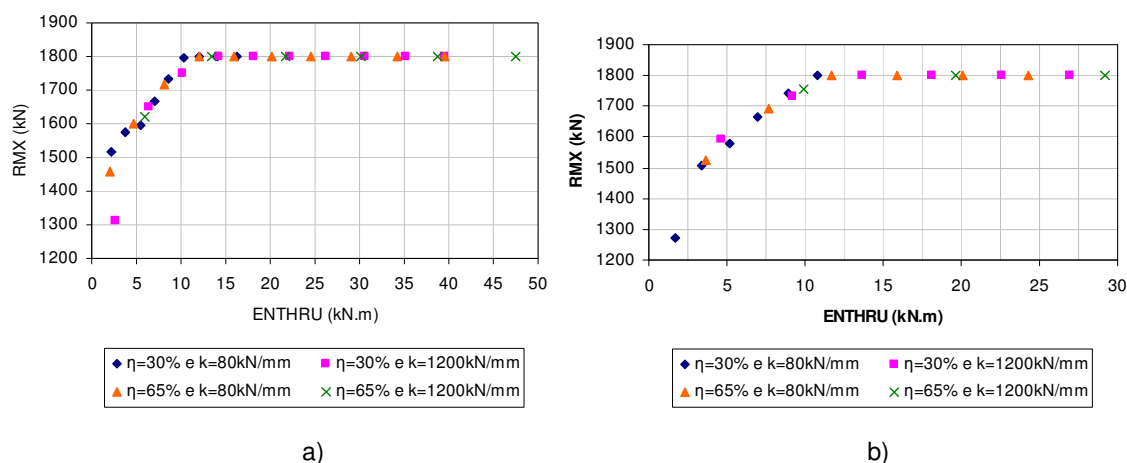


Figura 41 – Resistência máxima mobilizada *versus* energia transmitida; a) Altura de queda de 2 m e peso de martelo variável; b) Peso de martelo de 35,3 kN e altura de queda variável

Observa-se que a resistência imposta à estaca, de 1800 kN, é atingida a partir da transmissão de energia de cerca de 10 kN.m. Esse valor varia de acordo com o diâmetro das estacas e as resistências testadas.

As tensões de compressão e tração aumentam com a energia transmitida e são fortemente influenciadas pela rigidez. Isso pode ser verificado nas Figuras 42 e 43, obtidas para as simulações com a estaca média, resistência de 1800 kN, peso do pilão de 35,3 kN e alturas de queda variando de 0,5 a 3,0m.

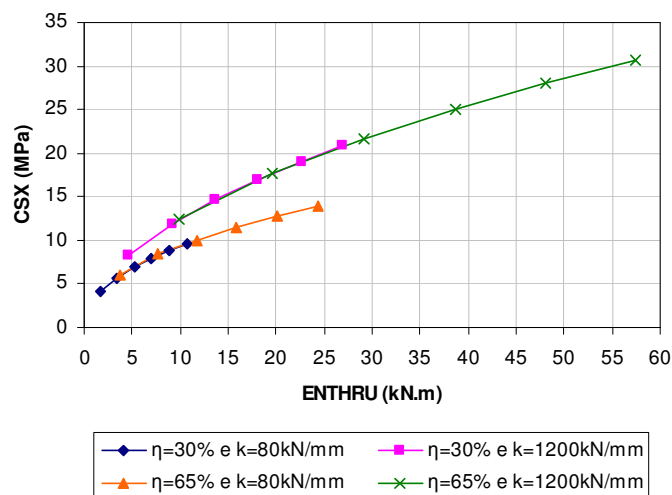


Figura 42 – Energia transmitida *versus* tensões de compressão

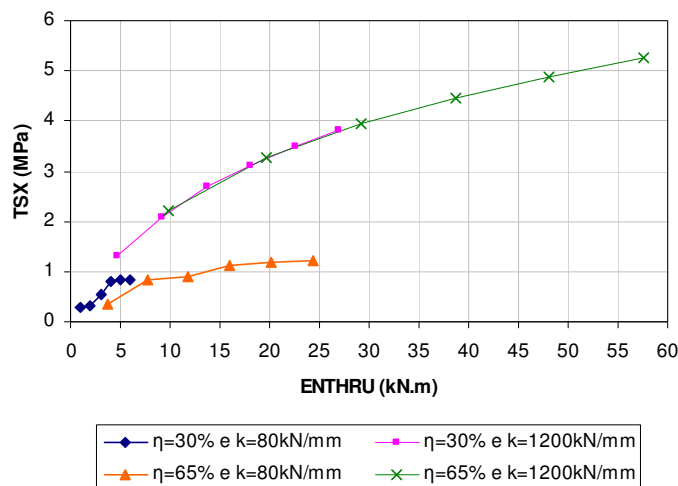


Figura 43 – Energia transmitida *versus* tensões de tração

A eficiência do sistema, parâmetro obtido a partir da comparação entre a energia aplicada e transmitida ao sistema, tende a aumentar com o incremento do peso do martelo. A Figura 44a mostra essa relação para a estaca média com resistência intermediária. Entretanto, a eficiência mantém-se praticamente constante para um dado peso do martelo, como exposto na Figura 44b, para o peso de 35,3 kN.

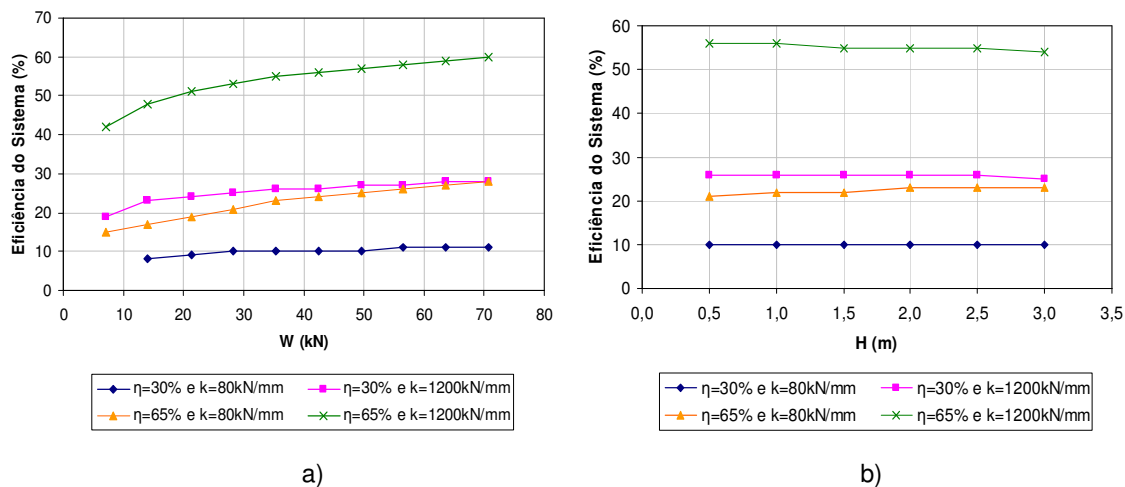


Figura 44 – a) Peso do martelo *versus* eficiência do sistema, para altura de queda constante; b) Altura de queda *versus* eficiência do sistema, para peso de martelo constante

Em geral, para todas as combinações testadas as relações descritas se verificam.

### 4.3 DEFINIÇÃO DE CRITÉRIOS PARA ESTACAS MODELO

Para o estudo e a proposição de um critério de seleção do sistema de impacto e amortecimento aplicável às estacas, buscou-se definir relações para as quais as três estacas modelo apresentariam resultados satisfatórios, considerando as eficiências de 30 e 65 %, isto é:

- Mobilização da resistência imposta
- Tensão de compressão máxima de 20 MPa
- Tensão de tração limite de 2 MPa

Para tanto, de acordo com os resultados das análises anteriores, faz-se necessário a definição de uma rigidez intermediária e de uma energia potencial que conduza a valores de eficiência do sistema correspondentes à realidade brasileira.

Algumas relações foram avaliadas e simuladas a fim de garantir as condições impostas expostas acima.

Inicialmente, relações para a definição do peso do martelo baseadas na relação entre o peso do mesmo e da estaca foram testados. De acordo com os resultados obtidos anteriormente simularam-se pesos dados pelas relações de  $W/W_p$  de 0,6 a 1,0. No entanto, as mesmas não apresentaram bons resultados. As estacas moldadas *in loco* possuem uma diversidade de geometrias. Um critério de seleção deste tipo exigiria um estudo detalhado e a ramificação para estacas de diferentes características.

É usual referir-se ao peso do martelo como uma percentagem da resistência estática estimada (Hussein *et al.*, 1996; PDI, 2008). Os pesos de martelos utilizados nas simulações anteriores foram avaliados como percentagem da resistência estática imposta e encontram-se nos Quadros 10, 11 e 12.

Pode-se verificar que, caso consideremos a resistência última como os valores inferiores de resistência impostos, o valor da percentagem é relativamente maior em relação ao valor médio. Enquanto que, ao considerarmos valores superiores, a percentagem tende a ser menor.

W (kN)	W/Ru (%)		
	1000	2000	3000
6,1	0,6	0,3	0,2
12,2	1,2	0,6	0,4
18,3	1,8	0,9	0,6
24,4	2,4	1,2	0,8
30,5	3,1	1,5	1,0
36,6	3,7	1,8	1,2
42,7	4,3	2,1	1,4
48,9	4,9	2,4	1,6
55,0	5,5	2,7	1,8
61,1	6,1	3,1	2,0

Quadro 10 – Percentagens em relação à RU para estaca curta

W (kN)	W/Ru (%)		
	800	1800	2800
7,1	0,9	0,4	0,3
14,1	1,8	0,8	0,5
21,2	2,7	1,2	0,8
28,3	3,5	1,6	1,0
35,3	4,4	2,0	1,3
42,4	5,3	2,4	1,5
49,5	6,2	2,7	1,8
56,5	7,1	3,1	2,0
63,6	8,0	3,5	2,3
70,7	8,8	3,9	2,5

Quadro 11 – Percentagens em relação à RU para estaca média

W (kN)	W/Ru (%)		
	600	1600	2600
6,0	1,0	0,4	0,2
12,1	2,0	0,8	0,5
18,1	3,0	1,1	0,7
24,1	4,0	1,5	0,9
30,2	5,0	1,9	1,2
36,2	6,0	2,3	1,4
42,2	7,0	2,6	1,6
48,3	8,0	3,0	1,9
54,3	9,1	3,4	2,1
60,3	10,1	3,8	2,3

Quadro 12 – Percentagens em relação à RU para estaca longa

Enfatizando-se os pesos de martelos que conduziram a bons resultados nas simulações anteriores como percentagem da resistência estática média imposta, tem-se o Quadro 13.

Estaca	Ru (kN)	Percentagem Ru média
Curta	1000	1,8 a 3,1
	2000	1,2 a 3,1
	3000	1,5 a 3,0
Média	800	3,5 a 3,9
	1800	2,4 a 3,9
	2800	2,7 a 3,1
Longa	600	3,8
	1600	1,9 a 3,8
	2600	2,3 a 3,8

Quadro 13 – Percentagens em relação à RU média

Isto conduziu a definição de uma faixa de percentagens aceitáveis. Os pesos dos martelos, cujos resultados foram satisfatórios, representados por percentagens da resistência média variam em torno de 1,2 a 3,9 %.

A utilização de alturas de queda relacionadas ao comprimento da estaca, como proposto por Hussein *et al.* (1996), no caso das estacas-modelo, não conduziu a bons resultados. O intervalo de altura obtido nas simulações anteriores como percentagens do comprimento das estacas resultam em um intervalo de grande variação.

Buscando um menor intervalo de variação, percebe-se que as alturas de queda podem ser representadas em função do diâmetro da estaca. No Quadro 14 podem ser observadas as relações obtidas para as estacas modelo.

Estaca	D (cm)	H (m)					
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
		H/D					
Curta	60	0,8	1,7	2,5	3,3	4,2	5,0
Média	50	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
Longa	40	1,3	2,5	3,8	5,0	6,3	7,5

Quadro 14 – Relações entre altura de queda e diâmetro

De acordo com os resultados obtidos nas simulações, as alturas de queda mais satisfatórias variam entre 1,0 e 2,5 m. O intervalo que corresponde às alturas de quedas que conduzem a bons resultados varia entre  $1,7D$  e  $6,3D$ . Observa-se que para maiores diâmetros as relações tendem a ser menores.

Para a rigidez, sabe-se que valores intermediários conduzem a bons resultados. Ela pode ser obtida através da espessura do amortecimento, a partir da Equação 22. O ideal seria definir uma espessura de amortecimento, visto que é o parâmetro que pode ser manipulado diretamente em campo. No entanto, as informações a respeito da geometria e as características do material utilizado nos ensaios são limitadas.

Por esta razão, buscaram-se relações para a obtenção de uma espessura de amortecimento que levariam a um valor de rigidez dentro dos limites verificados nas etapas anteriores, porém, a utilização de um valor intermediário constante para a rigidez não foi descartado.

Hussein *et al.* (1996) indica a seleção da espessura em função da razão  $L^2/2D$ . No entanto, através de simulações, verifica-se que uma relação baseada na razão  $L/D$  conduz a valores de eficiência do sistema dentro do limite verificado nas análises precedentes.

Então, três situações foram estudadas:

- Mantendo-se a espessura do amortecimento constante igual a 10 cm para todos os casos, onde a rigidez é variada;
- Mantendo-se a rigidez constante com o valor intermediário adotado, de 500 kN/mm, caso em que a espessura é variada;
- Utilizando-se a espessura em função da relação  $L/D$ , onde se tornam variáveis a rigidez e a espessura.

Levando em consideração essas relações e os resultados obtidos anteriormente, tem-se a proposta de um critério para a obtenção do golpe de mobilização da maior resistência.

Determinaram-se três coeficientes:  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$ . O coeficiente  $X_1$  representa a relação entre o peso do martelo e a resistência última em termos percentuais;  $X_2$  é dado pela relação entre a altura de queda, no golpe de mobilização da resistência última, e o diâmetro da estaca;  $X_3$  é dado pela relação  $tD/L$ .

Para a rigidez foram considerados ainda espessura constante igual a 10 cm e rigidez constante igual a 500 kN/mm.

Então, um critério pode ser estabelecido, tal que:

- $W = X1 R_u$
- $H = X2 D$

Onde,  $W$  (kN) é o peso do martelo e  $H$  (m) é a altura de queda.

A influência da rigidez será analisada de acordo com as considerações mencionadas, ou seja:

- $t = 10 \text{ cm}$
- $K = 500 \text{ kN/mm}$
- $t = X3 L/D \text{ (cm)}$

As estacas modelo foram submetidas a novas simulações. Diversas combinações de  $X1$ ,  $X2$  e  $X3$  foram testadas.

Para  $X1$  foram adotados os valores: 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0 % da resistência média imposta. Valores maiores do que 3,0% não foram utilizados, por conduzirem a pilões mais pesados, indesejáveis sob condições práticas.

As alturas de queda simuladas variaram de 2 a 5D.

Para  $X3$  foram selecionados valores que conduziam a uma rigidez intermediária e a uma eficiência do sistema compatível com os limites verificados. São elas:  $L/2D$ ;  $L/2,5D$ ;  $L/3D$ ;  $L/4D$ ;  $L/5D$  e  $L/6D$ .

Foram considerados os dados do solo e da estaca supracitados. No entanto, apenas uma resistência foi utilizada: a resistência média anteriormente imposta às estacas.

Os parâmetros que foram variados são o peso e a eficiência do martelo, a altura de queda e a rigidez do amortecimento. O coeficiente de restituição foi mantido igual a 0,5.

Para cada estaca foram criadas duas planilhas em Excel: uma para a menor eficiência e outra para a maior eficiência. Cada uma delas contém simulações para cinco martelos e quatro alturas de queda. Os resultados podem ser verificados no Apêndice C.

Utilizando-se a espessura de 10 cm constante para os três casos, em geral, os resultados não foram satisfatórios. A maioria das simulações indicou tensões estruturais excedentes. Os melhores resultados foram obtidos para os pesos dados por  $X1$  igual a 2,0, 2,5 e 3,0 % da resistência última, que apresentaram tensões

aceitáveis para a eficiência de 30 %. Para a eficiência de 65 % a menor altura de queda também apresentou resultados satisfatórios.

Para a rigidez intermediária constante os resultados foram satisfatórios para pesos de 1,5 a 2,5 % com alturas de queda de 3D e 4D.

Utilizando-se a espessura definida em função da relação  $L/D$ , diversas combinações são possíveis, dentre as quais podemos citar:

- $W = 1,5\% R_u$ ,  $H = 5D$  e  $t = L/2D$ ;
- $W = 2,0\% R_u$ ,  $H = 4D$  e  $t = L/4D$ ;
- $W = 2,5\% R_u$ ,  $H = 3D$  e  $t = L/2,5D$ ;
- $W = 3,0\% R_u$ ,  $H = 2D$  e  $t = L/3D$ .

O peso de martelo definido por  $W = 1\% R_u$  não foi suficiente para mobilizar a resistência das estacas média e longa para a eficiência de 30 %. Em geral conduzem a altas tensões de tração.

Alguns intervalos também podem ser destacados. Por exemplo, as combinações de peso de 1,5 a 2,5 %  $R_u$  com altura de queda de 4 a 5D e espessura do amortecimento de  $L/2D$  a  $L/3D$ , conduziram a bons resultados para as três estacas.

#### 4.4 COMPARAÇÃO COM O BANCO DE DADOS

As relações propostas para as três estacas modelo foram comparadas com o banco de dados a fim de verificar se são pertinentes às diversas condições que podem ser encontradas na prática nacional.

A percentagem da resistência que corresponde ao peso do martelo foi obtida diretamente dos dados dos ensaios, bem como a relação entre a altura de queda e o diâmetro. As espessuras dos amortecimentos foram estimadas a partir da Equação 22. Os resultados podem ser vistos no Quadro 15.



Estaca	D (cm)	L (m)	W (kN)	H (m)	K (kN/mm)	Ru (kN)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência (%)	X1 (%)	X2	X3
E32/OAG07	50	14,5	40,5	2,8	352	2264,3	18,5	0,2	38	1,8	5,6	0,51
E29/OAG10	50	22,5	50,0	3,2	585	3329,4	30,2	2,4	36	1,5	6,4	0,20
E08/OAG11	50	23,4	50,0	3,2	358	2468,5	26,6	1,7	40	2,0	6,4	0,31
E31/OAG12	50	23,5	50,0	3,2	302	3756,5	20,4	1,8	30	1,3	6,4	0,36
E10/OAG18	50	12,7	50,0	1,8	331	2451,0	17,2	1,0	45	2,0	3,6	0,62
TEB/OAG18	50	14,7	50,5	2,2	299	2915,6	18,6	1,0	46	1,7	4,4	0,59
TE/OAG20	50	14,5	40,5	2,0	580	2999,9	17,6	0,1	21	1,4	4,0	0,31
TE/OAG22	50	19,6	40,5	2,6	850	4579,6	23,2	0,0	36	0,9	5,2	0,16
E21/OAG01	50	22,5	50,0	2,0	1063	2942,1	16,4	1,1	24	1,7	4,0	0,11
TE/OAG05	50	14,2	50,0	2,0	417	2475,9	19,5	0,6	40	2,0	4,0	0,44
E0019	40	18,8	31,0	1,2	894	1579,7	25,0	2,3	55	2,0	3,0	0,08
E0031	40	20,8	31,0	1,5	910	1861,1	26,7	1,6	59	1,7	3,8	0,07
E0231	40	18,4	31,0	1,5	2345	1069,6	22,4	5,7	41	2,9	3,8	0,03
E0246	40	18,3	31,0	1,1	4150	1506,8	23,3	1,7	54	2,1	2,8	0,02
E0435	40	18,6	31,0	1,5	2025	1646,7	26,4	3,2	56	1,9	3,8	0,04
E0535	40	20,6	31,0	1,2	2860	1060,0	22,5	2,6	50	2,9	3,0	0,02
E0624	40	20,5	31,0	1,7	490	1727,5	23,5	2,2	50	1,8	4,3	0,13
E0631	40	20,5	31,0	1,3	2800	1336,3	21,7	1,5	43	2,3	3,3	0,02
E0647	60	17,4	51,0	1,8	814	1327,4	12,0	1,5	15	3,8	3,0	0,32
E0674	60	18,7	51,0	2,0	835	1920,0	12,4	2,8	16	2,7	3,3	0,29
E0720	40	20,3	31,0	1,4	2170	1562,5	24,8	2,7	44	2,0	3,5	0,03
E0725	40	19,4	31,0	1,7	609	1136,5	16,8	2,0	27	2,7	4,3	0,11
E0773	40	19,6	31,0	1,5	1420	1320,3	25,2	2,3	52	2,3	3,8	0,05
E0778	40	18,1	31,0	0,9	1045	1102,0	22,8	3,7	82	2,8	2,3	0,07
E0896	40	20,6	31,0	1,2	2560	1216,5	22,9	3,7	57	2,5	3,0	0,03
E0926	40	19,6	31,0	0,7	1840	1046,6	16,8	3,2	60	3,0	1,8	0,04
E1076	40	21,2	31,0	0,9	4530	1560,1	22,6	3,3	62	2,0	2,3	0,01
E1200	40	20,6	31,0	1,0	2390	1691,4	24,7	1,9	60	1,8	2,5	0,03
E1251	50	19,9	31,0	1,5	2070	1981,4	23,8	1,8	55	1,6	3,0	0,06
E1297	40	21,4	31,0	1,0	4800	1834,5	23,3	2,5	55	1,7	2,5	0,01
E1636	50	19,2	51,0	1,1	4200	1936,3	22,3	4,4	54	2,6	2,2	0,03
E1693	60	21,3	51,0	1,7	2600	2969,8	20,1	2,9	37	1,7	2,8	0,08
E1910	50	20,1	51,0	1,4	3650	1112,2	19,4	4,1	20	4,6	2,8	0,04
E2000	40	18,1	31,0	1,8	778	1119,7	19,8	1,3	25	2,8	4,5	0,09
E2136	50	18,4	51,0	1,7	1420	1724,8	16,7	1,1	19	3,0	3,4	0,10
E-1983	30	10,1	20,0	1,4	207	518,5	17,0	0,5	38	3,9	4,7	0,27
P338	40	24,0	16,0	1,2	760	1492,3	13,7	1,8	21	1,1	3,0	0,07
P21QA	80	23,0	80,0	2,8	572	4024,9	14,8	3,1	33	2,0	3,5	0,81
P23JA	80	22,5	80,0	2,8	374	4292,7	11,4	3,0	19	1,9	3,4	1,26
E009	60	16,0	39,5	2,5	1075	2478,9	15,2	2,5	22	1,6	4,2	0,26
E017	50	15,2	39,5	2,0	975	2280,6	23,2	1,8	44	1,7	4,0	0,18
E045	50	17,4	39,5	1,6	1790	1960,4	20,7	2,6	44	2,0	3,2	0,08
E051	50	16,6	39,5	1,8	2250	2114,8	24,1	5,2	50	1,9	3,6	0,07
E058	50	16,6	39,5	1,4	1740	2322,6	23,8	6,0	62	1,7	2,8	0,09
E066	50	16,7	39,5	1,4	1214	2149,0	19,4	2,0	54	1,8	2,8	0,13
E071	50	17,1	39,5	1,8	1255	2434,9	19,0	3,3	36	1,6	3,6	0,12
E079	50	18,9	39,5	1,4	758	2340,5	16,7	5,4	44	1,7	2,8	0,18
E084	60	17,1	39,5	2,0	1515	2482,1	19,0	3,6	39	1,6	3,3	0,17
E-54	50	11,4	15,0	1,0	915	900,2	9,0	2,1	23	1,7	2,0	0,25
P-2A	65	14,8	50,0	2,0	843	3388,6	14,8	1,6	23	1,5	3,1	0,46

Estaca	D (cm)	L (m)	W (kN)	H (m)	K (kN/mm)	Ru (kN)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência (%)	X1 (%)	X2	X3
P-19B	65	14,8	50,0	2,0	803	2342,0	13,4	3,0	30	2,1	3,1	0,48
P-24I	65	14,8	50,0	2,2	877	2301,2	11,6	1,8	21	2,2	3,4	0,44
E08	40	14,4	16,0	1,6	955	1036,2	14,3	0,9	38	1,5	4,0	0,10
E36	40	14,7	16,0	0,8	1030	1164,6	14,6	0,4	48	1,4	2,0	0,09
E41	40	14,7	16,0	1,0	5800	1050,7	16,9	3,0	48	1,5	2,5	0,02
E71	40	14,5	16,0	1,2	440	1001,3	12,2	3,0	27	1,6	3,0	0,21
E75	40	14,3	16,0	1,7	223	1222,5	12,1	1,4	31	1,3	4,3	0,42
E87	40	14,3	16,0	1,4	2000	1013,0	16,5	1,1	35	1,6	3,5	0,05
E-115	50	16,4	31,0	1,3	872	2145,5	13,5	1,4	33	1,4	2,5	0,18
E03	60	8,0	20,0	2,4	647	1332,5	8,1	1,5	15	1,5	4,0	0,86
E18	60	7,5	20,0	2,2	994	2160,5	11,6	0,8	25	0,9	3,7	0,60
E24	50	9,5	20,0	1,6	576	1554,5	9,2	0,9	21	1,3	3,2	0,47
E25	50	9,0	20,0	1,2	714	1931,5	9,0	0,8	28	1,0	2,4	0,40
E61	50	23,5	35,0	0,6	466	2244,4	6,1	0,8	18	1,6	1,2	0,24
E68	50	23,5	35,0	1,4	856	2416,9	12,3	1,2	23	1,4	2,8	0,13
E187	50	19,5	35,0	0,6	1150	2345,8	10,1	1,1	26	1,5	1,2	0,12
F4	50	6,6	36,0	0,8	128	409,6	6,7	0,0	47	8,8	1,6	3,06

Máximo	80,0	3,2	5800,0	4579,6	30,2	6,0	81,7	8,8	6,4	3,06
Mínimo	15,0	0,6	128,0	409,6	6,1	0,0	15,3	0,9	1,2	0,01
Média	36,3	1,6	1404,7	1961,0	18,0	2,1	38,3	2,1	3,4	0,26
Desvio Padrão	13,7	0,6	1216,4	866,8	5,6	1,3	14,8	1,1	1,1	0,42
Mediana	35,0	1,5	915,0	1920,0	18,5	1,8	38,1	1,8	3,3	0,13

Quadro 15 – Relações obtidas para o banco de dados

O peso do martelo dado em percentagem da resistência máxima mobilizada no ensaio conduz ao intervalo compreendido entre 1,0 e 3,0 %, para 88 % das estacas. É importante levar em consideração os resultados para os quais a resistência mobilizada no ensaio foi considerada como sendo a resistência última (Ru). Esta constatação foi realizada através da observação das curvas resistência máxima mobilizada (RMX) *versus* deslocamento máximo (DMX). O peso do martelo dado em percentagem da resistência última conduz ao intervalo compreendido entre 1,0 e 3,0 %, para 91 % das estacas (Figura 45). Dos pesos utilizados nos ensaios, 62% estão dentro do intervalo compreendido entre 1,5 e 2,5 %.

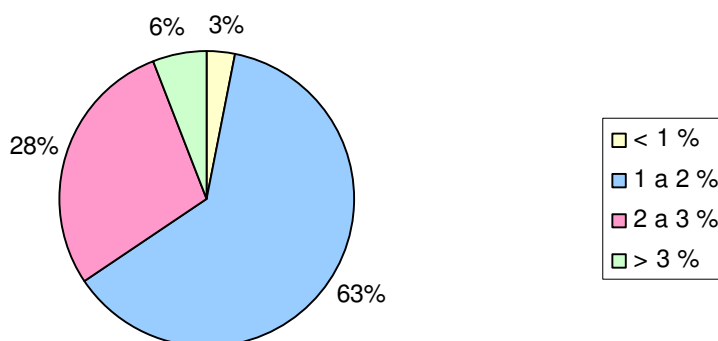


Figura 45 – Peso do martelo em percentagem da RU

Através da análise do banco de dados percebe-se uma tendência de maiores resistências conduzirem a menores valores de  $X_1$ , enquanto que menores valores de resistência tendem a maiores valores de  $X_1$ . Esse conceito está ilustrado na Figura 46a, onde estão inseridos os valores de  $X_1$  *versus* a resistência máxima mobilizada no ensaio (RMX). Na Figura 46b, considerou-se apenas os resultados em que a resistência mobilizada foi considerada última (Ru).

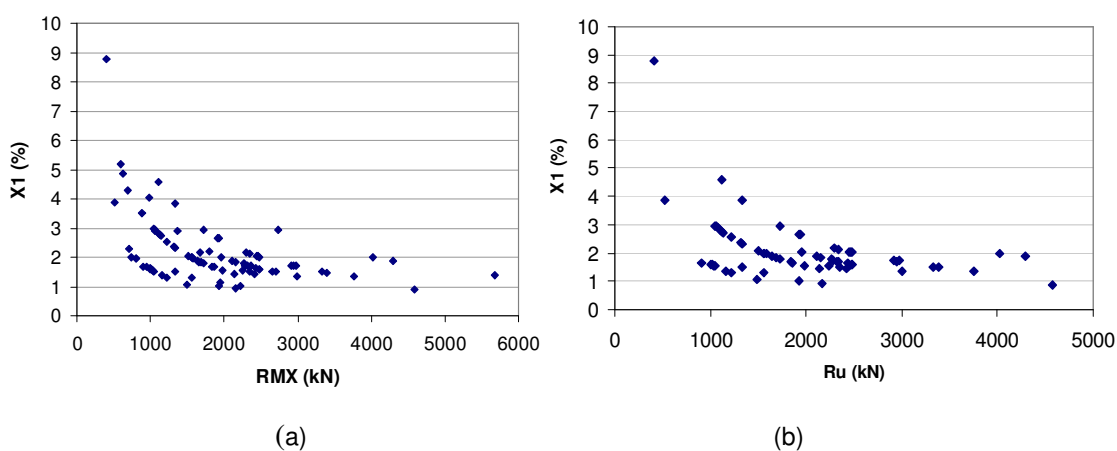


Figura 46 – a)  $X_1$  *versus* RMX; b)  $X_1$  *versus* RU

Para as estacas modelo as alturas de queda cujos resultados foram considerados satisfatórios correspondem ao intervalo compreendido entre 1,7D e 5D. A mesma relação foi avaliada para as estacas pertencentes ao banco de dados,

nas quais a resistência máxima mobilizada no ensaio foi considerada como sendo a resistência última ( $R_u$ ). Os resultados podem ser vistos na Figura 47.

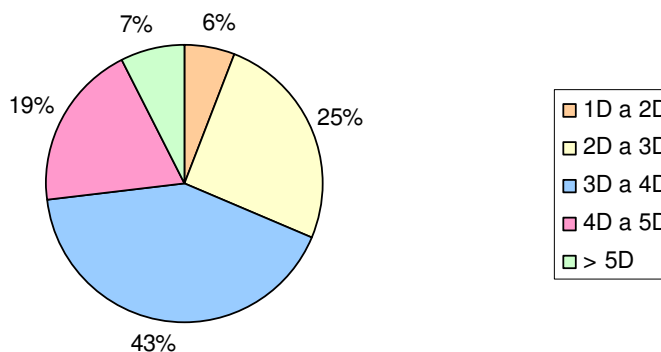


Figura 47 – Altura de queda em função do diâmetro

O intervalo de maior representatividade vai de 2D a 5D, correspondendo a 87 % das estacas.

As estacas de menores diâmetros apresentam maiores valores de  $X_2$ , enquanto que para os maiores diâmetros, o valor de  $X_2$  tende a diminuir. No entanto, através da Figura 48, pode-se perceber uma grande dispersão.

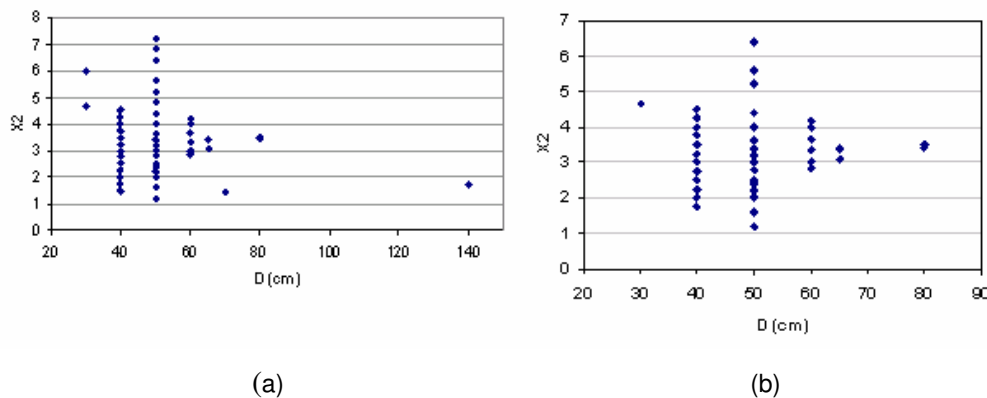


Figura 48 – a)  $X_2$  versus diâmetro, para RMX; b)  $X_2$  versus diâmetro, para RU

Com relação à rigidez, através da retro-análise realizada percebemos que os valores variam de 116 a 5800 kN/mm, tendo maior representatividade para valores inferiores a 1200 kN/mm. Uma rigidez intermediária não foi mantida constante.

Para os valores de  $X_3$ , calculados a partir das espessuras estimadas, 88 % dos casos compreendem o intervalo de 0,01 a 0,50. A Figura 49 ilustra esta ocorrência.

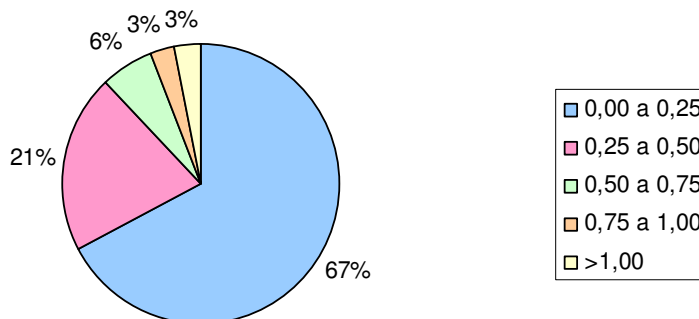


Figura 49 – Espessura do amortecimento em função de  $L/D$

Em geral, os valores testados para  $X_3$ , de  $1/6$  a  $1/2$ , estão compreendidos no intervalo analisado. Entretanto, sabe-se que estas relações foram selecionadas a fim de manter um valor de rigidez tal que mobilize a resistência e não exceda as tensões estruturais (20 MPa para compressão e 2 MPa para tração). Convém mencionar que no banco de dados são encontradas tensões ligeiramente superiores às pré-estabelecidas: das 90 estacas 94 % apresentam tensão de compressão até 25 MPa e 78 % delas apresentam tensão de tração até 3 MPa.

Estacas de menor relação  $L/D$  tendem a apresentar valores de  $X_3$  mais altos. Isto pode ser verificado na Figura 50.

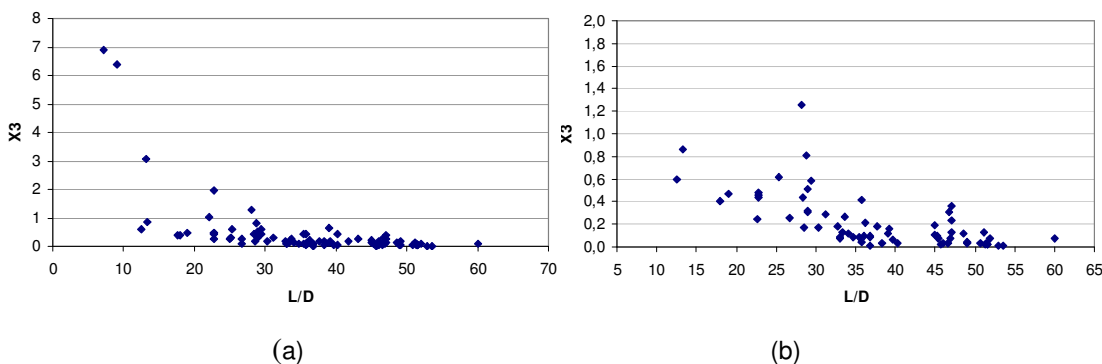


Figura 50 – a)  $X_3$  versus  $L/D$ , para RMX; b)  $X_3$  versus  $L/D$ , para RU

Em síntese, as relações encontradas para as estacas modelo são condizentes com as verificadas nas estacas pertencentes ao banco de dados.

Quanto à determinação de uma energia transmitida a partir da qual as resistências são mobilizadas, analisaram-se as relações entre RMX e EMX para os casos em que a resistência mobilizada foi considerada como resistência última. Não é possível obter esse valor a partir da verificação das resistências. O número de variáveis envolvidas torna complexa essa determinação.

Avaliou-se, através do Coeficiente de Pearson ( $r$ ), função disponível no Excel, a correlação entre variáveis. Ele quantifica a relação linear entre elas e indica se essa relação é direta (+) ou inversa (-). Varia de 1 a -1. O valor zero indica que não há dependência linear, mas, pode haver uma relação não linear.

O coeficiente  $r$  de Pearson é calculado a partir de duas matrizes. A matriz formada pelos valores de energia transmitida foi analisada juntamente com as matrizes de resistência máxima mobilizada, tensões, diâmetro e energia potencial aplicada no golpe. Os resultados estão dispostos no Quadro 16.

	RMX (kN)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	D (cm)	Ep (kN.m)
EMX (kJ)	0,7	0,5	0,2	0,4	0,8
Correlação	muito forte	substancial	baixa	moderada	muito forte

Quadro 16 – Correlação entre diversas variáveis

A partir dos resultados precedentes, percebe-se que essas relações variam com o diâmetro. Então, obtiveram-se os mesmos coeficientes para as estacas de 40 e 50 cm de diâmetro, maioria presente no banco de dados (Quadro 17).

	RMX (kN)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Ep (kN.m)
D = 40 cm	0,6	0,9	0,3	0,7
D = 50 cm	0,5	0,8	0,1	0,9
Correlação	substancial	muito forte	baixa	muito forte

Quadro 17 – Correlação entre variáveis para os diâmetros de 40 e 50 cm

Os resultados indicam que existe uma relação linear, mesmo que baixa, para todas as variáveis testadas. Percebe-se uma forte correlação entre a energia transmitida, tensões de compressão e resistências mobilizadas. Essa constatação trata-se de um fator relevante para a execução do ensaio, merecendo maior atenção. No entanto, o estudo destas relações desvia-se do escopo deste trabalho.

#### 4.5 APLICAÇÃO AO BANCO DE DADOS E VALIDAÇÃO DOS CRITÉRIOS

A partir das combinações estudadas nas etapas precedentes, cujos resultados foram satisfatórios, foram realizadas simulações sobre as 90 estacas. No entanto, consideraram-se apenas as estacas em que a resistência última foi alcançada. Os ensaios cuja resistência máxima mobilizada foi considerada como resistência última foram definidos a partir da verificação da ruptura nas curvas resistência máxima mobilizada (RMX) *versus* deslocamento máximo (DMX).

Os valores de entrada das análises consistem dos dados de ensaios dispostos no Apêndice A. Os parâmetros variáveis são: peso do martelo, altura de queda e espessura e rigidez do amortecimento.

Foram registrados para todas as estacas os resultados para a eficiência do martelo de 30 e 65 %.

Inicialmente, considerou-se a aplicação de combinações que se mostraram satisfatórias para as estacas modelo ao banco de dados, fixando-se relações para a obtenção do peso e da altura de queda. Duas análises foram realizadas: uma com espessura e rigidez variáveis, a partir da relação  $L/D$ , e outra com rigidez constante.

Como exemplo foi selecionada a combinação para a definição do peso do martelo como sendo 2 % da resistência última, altura de queda definida como sendo quatro vezes o diâmetro e a espessura do amortecimento considerada como um quarto da relação  $L/D$ .

Essas relações de peso e altura de queda conduziram a resultados satisfatórios para as estacas modelo, tanto para a rigidez constante como para variável. Além disso, trata-se de uma combinação que se encaixa no intervalo de maior representatividade para o banco de dados.

A combinação foi testada às 90 estacas (vide Apêndice D). No entanto, foram consideradas as estacas em que a resistência máxima mobilizada representa a resistência última. Um resumo pode ser visto no Quadro 18.

Os principais resultados para a rigidez variável são:

- 64 % das resistências foram mobilizadas para  $\eta = 30 \%$
- 96 % das resistências foram mobilizadas para  $\eta = 65 \%$

Estaca	Obtido na Combinação			$\eta=30\%$				$\eta=65\%$			
	W (kN)	H (m)	K (kN/mm)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência (%)	Res. Mob. (kN)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência (%)	Res. Mob. (kN)
E32/OAG07	45,3	2,0	714	15,505	2,281	25	1760	22,716	4,133	54	2095
E29/OAG10	66,6	2,0	460	18,213	0,560	21	3329	26,285	1,069	47	3329
E08/OAG11	49,4	2,0	442	13,122	3,084	21	2238	19,358	3,866	43	2469
E31/OAG12	75,1	2,0	440	14,150	1,426	18	3751	20,576	3,483	39	3757
E10/OAG18	49,0	2,0	815	16,777	3,039	25	2201	24,592	5,266	52	2451
TEB/OAG18	58,3	2,0	704	16,242	2,635	24	2487	23,907	4,234	51	2916
TE/OAG20	60,0	2,0	714	19,796	0,623	23	3000	28,832	1,129	50	3000
TE/OAG22	91,6	2,0	528	18,786	0,789	22	4569	27,051	0,844	48	4580
E21/OAG01	58,8	2,0	460	13,415	1,928	21	2877	19,799	2,362	45	2942
TE/OAG05	49,5	2,0	729	17,368	1,275	26	2131	25,274	0,961	55	2476
E0019	31,6	1,6	282	13,473	2,044	25	1514	19,699	2,514	52	1580
E0031	37,2	1,6	255	13,889	0,988	23	1861	19,991	1,272	50	1861
E0231	21,4	1,6	288	11,908	2,661	22	922	17,388	3,986	47	1063
E0246	30,1	1,6	290	13,080	1,080	23	1507	18,963	1,362	49	1507
E0435	32,9	1,6	285	13,675	2,213	24	1647	19,973	2,606	52	1647
E0535	21,2	1,6	257	11,450	1,977	22	1060	16,731	2,888	22	1060
E0624	34,6	1,6	258	12,429	0,897	23	1593	18,132	0,990	49	1728
E0631	26,7	1,6	258	12,515	0,719	23	1188	18,293	1,415	49	1336
E0647	26,5	2,4	1028	12,587	5,681	21	1327	18,679	7,440	45	1327
E0674	38,4	2,4	956	14,453	5,422	23	1920	21,279	7,378	49	1920
E0720	31,3	1,6	261	13,522	0,924	22	1551	19,923	1,187	47	1563
E0725	22,7	1,6	273	11,041	1,838	22	1137	16,259	3,225	46	1137
E0773	26,4	1,6	270	11,800	1,883	22	1130	17,225	2,340	46	1320
E0778	22,0	1,6	293	12,188	1,741	22	1102	17,782	2,799	47	1102
E0896	24,3	1,6	257	11,362	1,746	22	1217	16,573	2,870	46	1217
E0926	20,9	1,6	270	10,564	2,494	23	977	15,479	3,690	48	1047
E1076	31,2	1,6	250	13,334	0,727	23	1537	19,387	1,439	49	1560
E1200	33,8	1,6	257	14,557	1,071	23	1547	20,337	1,393	49	1691
E1251	39,6	2,0	520	14,984	1,425	23	1981	21,908	2,469	49	1981
E1297	36,7	1,6	248	14,245	1,100	22	1823	20,716	1,715	47	1835
E1636	38,7	2,0	539	14,815	4,373	24	1875	21,719	5,510	51	1936
E1693	59,4	2,4	840	16,197	2,023	24	2970	23,726	1,926	52	2970
E1910	22,2	2,0	515	12,521	4,008	22	1112	18,597	5,234	47	1112
E2000	22,4	1,6	293	12,547	2,930	24	1106	18,355	4,297	51	1120
E2136	34,5	2,0	563	14,232	2,741	23	1725	20,933	3,706	49	1725
E-1983	10,4	1,2	221	10,938	2,716	24	472	15,985	3,280	51	519
P338	29,8	1,6	221	12,337	1,477	23	1492	18,017	1,750	49	1492
P21QA	80,5	3,2	1843	17,291	8,250	23	3607	25,420	11,462	49	4025
P23JA	85,9	3,2	1884	17,942	7,710	24	4293	26,394	10,660	50	4293
E009	49,6	2,4	1118	16,396	2,289	25	2479	24,121	3,184	52	2479
E017	45,6	2,0	681	16,035	0,875	25	2085	23,553	1,054	54	2281
E045	39,2	2,0	595	14,799	1,808	24	1756	21,802	2,596	50	1960
E051	42,3	2,0	623	15,568	1,573	24	2115	22,833	2,523	51	2115
E058	46,5	2,0	623	15,829	1,656	25	2323	23,091	2,849	53	2323
E066	43,0	2,0	620	15,005	2,654	24	2149	22,213	4,580	50	2149
E071	48,7	2,0	605	16,239	0,444	24	2247	23,709	0,495	52	2435
E079	46,8	2,0	548	15,291	2,480	24	2341	22,375	4,366	52	2341
E084	49,6	2,4	1046	15,904	1,143	25	2422	23,452	1,311	52	2482
E-54	18,0	2,0	908	13,820	1,695	23	900	20,505	2,479	48	900



Estaca	Obtido na Combinação			$\eta=30\%$				$\eta=65\%$			
	W (kN)	H (m)	K (kN/mm)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência (%)	Res. Mob. (kN)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência (%)	Res. Mob. (kN)
P-2A	67,8	2,6	1536	19,062	2,710	26	3389	28,095	2,906	56	3389
P-19B	46,8	2,6	1536	15,568	6,763	24	2342	22,973	9,717	51	2342
P-24I	46,0	2,6	1536	14,651	4,350	23	2301	21,617	5,524	49	2301
E08	20,7	1,6	368	10,848	1,292	21	1036	15,874	2,613	44	1036
E36	23,3	1,6	360	12,593	1,560	23	1165	18,458	1,997	50	1165
E41	21,0	1,6	360	12,404	1,206	23	1051	18,084	1,246	49	1051
E71	20,0	1,6	365	12,117	2,176	24	1001	17,850	3,028	52	1001
E75	24,5	1,6	371	11,652	2,373	24	1223	17,108	3,573	51	1223
E87	20,3	1,6	371	12,438	2,020	24	1013	18,366	2,482	52	1013
E-115	42,9	2,0	631	14,330	0,836	22	2146	21,071	2,491	47	2146
E03	26,7	2,4	2236	13,316	2,464	24	1333	19,758	3,145	51	1333
E18	43,2	2,4	2385	15,783	1,157	26	2161	23,500	1,402	55	2161
E24	31,1	2,0	1039	13,220	0,631	24	1555	19,603	1,120	51	1555
E25	38,6	2,0	1150	12,051	0,546	21	1932	17,803	1,109	46	1932
E61	44,9	2,0	440	12,503	1,182	22	2244	18,205	3,042	46	2244
E68	48,3	2,0	440	14,262	0,818	22	2417	20,838	1,843	48	2417
E187	46,9	2,0	531	14,219	0,456	23	2346	20,833	0,649	49	2346
F4	8,2	2,0	1568	10,448	8,271	22	296	15,998	12,736	47	330

Máximo	91,6	3,2	2385,0	19,8	8,3	26,0	4569,0	28,8	12,7	56,0	4579,6
Mínimo	8,2	1,2	221,0	10,4	0,4	18,0	296,0	15,5	0,5	22,0	330,0
Média	39,2	1,9	665,2	14,1	2,2	23,1	1900,0	20,7	3,2	48,9	1957,2
Desvio padrão	17,3	0,4	502,0	2,2	1,8	1,4	850,7	3,1	2,5	4,5	868,5
Mediana	38,4	2,0	520,0	13,9	1,8	23,0	1823,0	20,3	2,6	49,0	1920,0

Quadro 18 – Resultados obtidos para a simulação com rigidez variável

Para três estacas (4 %) a resistência imposta não foi mobilizada. Foram elas: E32OAG07; E231 e F4. As estacas apresentam *quake* de ponta igual a 16,3, 9,39 e 19,58 mm, respectivamente. Percebe-se que quanto maior o *quake*, maior deve ser a energia necessária para mobilizá-lo. No caso destas três estacas, as tensões de tração ultrapassam o limite estabelecido antes da ativação da resistência.

Através dos resultados da retro-análise, observa-se que os martelos utilizados nos ensaios tendem a apresentar um valor baixo de eficiência. Por esta razão, enfatizaram-se os resultados obtidos para a eficiência do martelo de 30%. Os principais resultados são:

- Tensões de compressão variam de 10,4 a 19,8 MPa, 100 % dentro do valor estabelecido

- Tensões de tração variam de 0,4 a 8,3 MPa, 57 % delas encontram-se abaixo do limite pré-estabelecido (42 % com resistência mobilizada para  $\eta = 30\%$ ).
- Eficiência do sistema variando entre 18 e 26 %

As mesmas relações de peso e altura de queda foram novamente simuladas para as estacas pertencentes ao banco de dados considerando a rigidez constante de 500 kN/mm. Os resultados das simulações podem ser vistos no Apêndice E e encontram-se resumidos no Quadro 19.

Estaca	Obtido na Combinação		$\eta=30\%$				$\eta=65\%$			
	W (kN)	H (m)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência (%)	Resistência Mobilizada (kN)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência (%)	Resistência Mobilizada (kN)
E32/OAG07	45,3	2,0	14,297	0,953	24	1759	20,895	2,046	51	2098
E29/OAG10	66,6	2,0	18,506	0,563	22	3329	26,743	1,039	48	3329
E08/OAG11	49,4	2,0	13,614	3,408	21	2235	20,088	4,244	45	2469
E31/OAG12	75,1	2,0	14,647	1,653	19	3756	21,329	3,809	41	3756
E10/OAG18	49,0	2,0	14,831	0,505	23	2139	21,658	0,998	48	2451
TEB/OAG18	58,3	2,0	14,865	0,583	23	2483	21,851	0,876	48	2916
TE/OAG20	60,0	2,0	18,671	0,560	21	3000	27,059	0,883	45	3000
TE/OAG22	91,6	2,0	18,632	0,723	21	4550	26,802	0,774	47	4580
E21/OAG01	58,8	2,0	14,028	1,497	20	2880	20,671	2,608	42	2942
TE/OAG05	49,5	2,0	16,143	0,747	24	2125	23,377	0,199	51	2476
E0019	31,6	1,6	15,319	1,086	26	1534	22,478	1,074	56	1580
E0031	37,2	1,6	15,735	1,068	26	1861	22,865	1,150	56	1861
E0231	21,4	1,6	13,562	3,828	25	927	19,942	5,649	52	1065
E0246	30,1	1,6	14,672	1,234	25	1507	21,394	0,851	54	1507
E0435	32,9	1,6	15,274	2,159	26	1647	22,460	1,586	56	1647
E0535	21,2	1,6	13,439	2,977	25	1060	19,739	4,055	53	1060
E0624	34,6	1,6	14,350	1,857	26	1615	21,018	2,815	55	1728
E0631	26,7	1,6	14,537	1,935	26	1202	21,335	2,899	54	1336
E0647	26,5	2,4	10,166	4,155	18	1327	14,898	5,585	24	1327
E0674	38,4	2,4	12,063	3,868	20	1920	17,683	5,474	43	1920
E0720	31,3	1,6	15,149	1,469	25	1556	22,661	1,918	54	1562
E0725	22,7	1,6	12,813	2,675	24	1136	18,934	4,024	52	1136
E0773	26,4	1,6	13,638	2,689	25	1139	20,069	3,920	52	1320
E0778	22,0	1,6	13,768	2,441	25	1102	20,187	4,062	52	1102
E0896	24,3	1,6	13,399	3,011	25	1216	19,647	4,498	52	1216
E0926	20,9	1,6	12,105	3,807	23	954	17,814	5,393	49	1047
E1076	31,2	1,6	15,362	1,205	26	1560	22,477	1,468	56	1560
E1200	33,8	1,6	16,478	1,312	26	1580	23,931	1,357	56	1691
E1251	39,6	2,0	14,847	1,398	23	1981	21,693	2,440	49	1981
E1297	36,7	1,6	16,142	0,884	25	1835	23,750	1,615	55	1835
E1636	38,7	2,0	14,569	4,211	24	1874	21,339	5,371	50	1936
E1693	59,4	2,4	14,450	1,971	22	2970	21,072	1,910	47	2970
E1910	22,2	2,0	12,432	3,960	22	1112	18,442	5,182	46	1112
E2000	22,4	1,6	14,152	4,296	26	1108	20,809	5,963	55	1120
E2136	34,5	2,0	13,827	2,482	22	1725	20,319	3,403	48	1725
E-1983	10,4	1,2	12,711	2,781	27	475	18,816	6,089	56	518
P338	29,8	1,6	15,022	0,563	25	1492	22,073	0,570	53	1492

Obtido na Combinação			$\eta=30\%$				$\eta=65\%$			
Estaca	W (kN)	H (m)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência (%)	Resistência Mobilizada (kN)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência (%)	Resistência Mobilizada (kN)
P21QA	80,5	3,2	11,665	4,786	17	3622	17,080	6,705	37	4025
P23JA	85,9	3,2	12,214	4,394	17	4293	17,843	6,301	37	4293
E009	49,6	2,4	13,603	1,208	21	2479	19,905	1,572	44	2479
E017	45,6	2,0	14,983	0,651	24	2077	21,971	0,534	51	2281
E045	39,2	2,0	14,190	1,272	23	1753	20,906	1,924	49	1960
E051	42,3	2,0	14,833	1,257	23	2115	21,722	1,902	49	2115
E058	46,5	2,0	15,134	1,375	24	2323	22,027	2,107	51	2323
E066	43,0	2,0	14,334	1,837	23	2149	21,151	4,173	48	2149
E071	48,7	2,0	15,607	0,441	24	2236	22,750	0,419	50	2435
E079	46,8	2,0	14,979	2,159	24	2336	21,901	3,882	51	2340
E084	49,6	2,4	13,560	0,637	21	2407	19,932	1,152	43	2482
E-54	18,0	2,0	12,335	1,657	20	900	18,193	3,169	42	900
P-2A	67,8	2,6	15,640	0,725	19	3389	22,809	2,483	42	3389
P-19B	46,8	2,6	11,446	4,180	19	2342	16,901	6,421	39	2342
P-24I	46,0	2,6	10,533	1,967	18	2301	15,558	3,011	37	2301
E08	20,7	1,6	11,699	1,597	22	1036	17,162	3,050	48	1036
E36	23,3	1,6	13,708	0,741	23	1165	20,113	1,775	50	1165
E41	21,0	1,6	13,522	1,357	22	1051	19,797	3,393	48	1051
E71	20,0	1,6	13,270	3,152	20	1001	19,540	5,226	53	1001
E75	24,5	1,6	12,574	3,184	24	1222	18,469	5,613	52	1222
E87	20,3	1,6	15,538	0,824	24	1013	19,989	1,712	52	1013
E-115	42,9	2,0	13,524	0,583	21	2146	19,881	2,110	44	2146
E03	26,7	2,4	8,854	0,374	17	1332	13,052	0,824	36	1332
E18	43,2	2,4	10,962	0,431	18	2160	16,268	0,547	37	2160
E24	31,1	2,0	10,994	0,680	21	1554	16,169	1,674	43	1554
E25	38,6	2,0	9,565	0,375	17	1932	14,108	1,145	36	1932
E61	44,9	2,0	12,904	1,258	22	2244	18,809	3,141	48	2244
E68	48,3	2,0	14,638	0,792	23	2417	21,412	1,849	49	2417
E187	46,9	2,0	14,036	0,504	22	2346	20,555	0,681	48	2346
F4	8,2	2,0	7,679	4,957	18	296	11,456	7,856	37	331

Máximo	91,6	3,2	18,7	5,0	27,0	4550,0	27,1	7,9	56,0	4580,0
Mínimo	8,2	1,2	7,7	0,4	17,0	296,0	11,5	0,2	24,0	331,0
Média	39,2	1,9	13,8	1,9	22,5	1900,1	20,2	2,9	47,8	1957,2
Desvio padrão	17,3	0,4	2,0	1,3	2,7	849,1	2,9	1,9	6,4	868,5
Mediana	38,4	2,0	14,0	1,4	23,0	1835,0	20,6	2,4	49,0	1920,0

Quadro 19 - Resultados obtidos para a simulação com rigidez igual a 500 kN/mm

Os resultados para a mobilização das resistências, em geral, foram os mesmos. No entanto, as tensões de compressão e tração diminuíram consideravelmente.

Para a eficiência do martelo de 30 %, passaram a apresentar tensões de compressão de 7,7 a 18,7 MPa e de tração de 0,4 a 5,0 MPa (66 % encontram-se

abaixo de 2 MPa. A mobilização de resistência para  $\eta = 30 \%$  e tensões aceitáveis ocorreram para 45 % das estacas. A eficiência do sistema variou entre 17 e 27 %.

Outras combinações testadas foram:

- $W = 1,5 \%$   $R_u$ ,  $H = 5D$  e  $t = L/3D$ ;
- $W = 2,5 \%$   $R_u$ ,  $H = 4D$  e  $t = L/3D$ ;
- $W = 3,0 \%$   $R_u$ ,  $H = 3D$  e  $t = L/2D$ .

Para as estacas em que a resistência máxima mobilizada foi considerada como resistência última os resultados são semelhantes:

- Para  $W = 1,5 \%$   $R_u$ ,  $H = 5D$  e  $t = L/3D$ : 21 % das resistências foram mobilizadas para  $\eta = 30$  e 65 % com tensões abaixo das especificadas, 88 % das resistências mobilizadas para  $\eta = 65 \%$ , tensões de tração altas para rigidez variável de acordo com a relação  $L/D$  e diminuição de tensões para rigidez constante.

- Para  $W = 2,5 \%$   $R_u$ ,  $H = 4D$  e  $t = L/3D$ : 54 % das resistências foram mobilizadas para  $\eta = 30$  e 65 % com tensões abaixo das especificadas, 99 % das resistências mobilizadas para  $\eta = 65 \%$ , tensões de tração altas para rigidez variável de acordo com a relação  $L/D$  e diminuição de tensões para rigidez constante.

- Para  $W = 3,0 \%$   $R_u$ ,  $H = 3D$  e  $t = L/2D$ : 55 % das resistências foram mobilizadas para  $\eta = 30$  e 65 % com tensões abaixo das especificadas, 99 % das resistências mobilizadas para  $\eta = 65 \%$ , tensões de tração altas para rigidez variável de acordo com a relação  $L/D$  e diminuição de tensões para rigidez constante.

Apenas uma estaca não teve a resistência mobilizada para nenhuma das combinações testadas, provavelmente por causa do alto valor de *quake* de ponta (19,58 mm).

Em alguns casos, onde o peso do pilão obtido como percentagem da resistência última for muito baixo ou muito alto, faz-se necessária a imposição de limites. Os pesos de 15 e 80 kN, limites encontrados no banco de dados, foram testados para as estacas que apresentaram esse inconveniente, e podem ser utilizados.

Deve-se notar que um critério onde a obtenção do peso do martelo, da altura de queda e da rigidez do amortecimento, se baseia em relações fixas, prioriza a mobilização das resistências para uma eficiência do martelo mais alta, de 65 %.

Sabe-se, a partir da retro-análise, que os ensaios estudados tendem a apresentar uma eficiência mais baixa, próxima ao valor de 30 %. Por esta razão,

buscou-se um novo enfoque para a obtenção do sistema de impacto e amortecimento.

Diversas linhas de tendência disponibilizadas pelo Excel foram testadas sobre os gráficos que mostram as correlações entre os coeficientes X1, X2 e X3 e a resistência última, diâmetro e relação L/D, respectivamente. Linhas de tendência que mostraram um melhor ajuste foram selecionadas e deram origem a um critério.

Para o valor de X1 utilizou-se a linha de tendência potência, ajustada ao gráfico dado pela Figura 46b. Para o valor de X3 utilizou-se um modelo exponencial, ajustado ao gráfico apresentado na Figura 50b. Para as alturas de queda utilizaram-se valores dados pelas relações mostradas na Figura 48b. Buscou-se manter as alturas dentro do intervalo de 1 e 3 m. No entanto, para altos valores de *quake*, uma maior altura de queda fez-se necessária. Os gráficos resultantes do ajuste e utilizados na obtenção dos resultados estão apresentados nas Figuras 51 e 52.

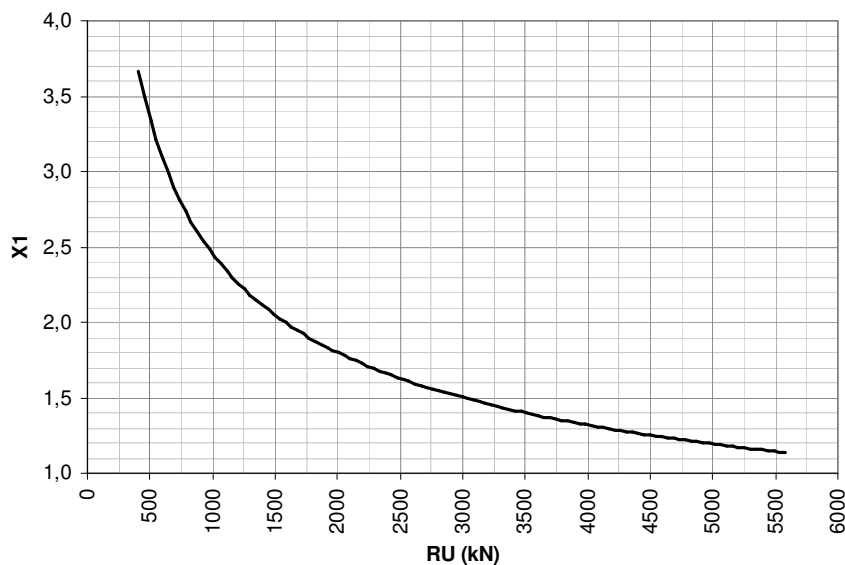


Figura 51 – Gráfico para a obtenção de X1

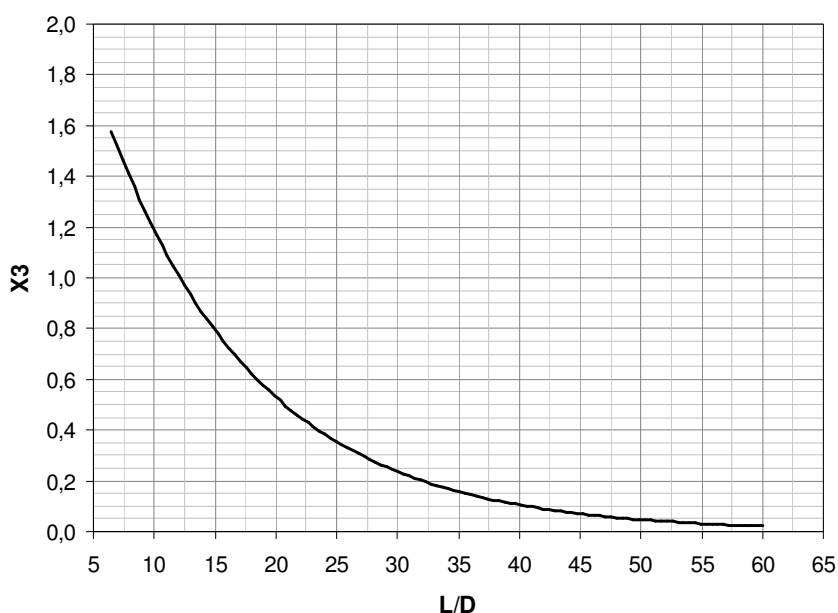


Figura 52 – Gráfico para a obtenção de X3

O critério de seleção do sistema de impacto e amortecimento baseado nas linhas de tendência ajustadas aos dados de ensaio foi testado para as 90 estacas, considerando uma espessura dada em função da relação  $L/D$ , uma rigidez intermediária e as eficiências do martelo de 30 e 65 %.

Os resultados das simulações podem ser visualizados no Apêndice F e estão resumidos no Quadro 20.

Em resumo 90 % das resistências foram mobilizadas para  $\eta = 30$  e 65 %. Todas as resistências foram mobilizadas para a eficiência de 65 %. Em geral, as estacas que não apresentaram resistências mobilizadas para a eficiência de 30 % apresentam valores de *quake* de ponta maior que 9,4 mm.

Para a eficiência do martelo de 30 %:

- Tensões de compressão variam de 6,8 a 22,6 MPa, estando 82 % dentro do valor estabelecido;
- Tensões de tração variam de 0,2 a 10,4 MPa, estando 36 % abaixo do limite pré-estabelecido;
- Eficiência do sistema variando entre 17 e 27 %.
- As resistências foram mobilizadas sob tensões aceitáveis para 35 % das estacas.

Estaca	Obtido pelo Critério			$\eta=30\%$				$\eta=65\%$			
	W (kN)	H (m)	K (kN/mm)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência (%)	Res. Mob. (kN)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência (%)	Res. Mob. (kN)
E32/OAG07	38,5	4,0	850	21,713	6,258	25	1942	31,877	8,361	53	2264
E29/OAG10	46,6	2,0	1438	19,879	2,356	26	3329	29,221	3,504	56	3329
E08/OAG11	42,0	2,5	1382	18,904	6,564	25	2181	27,946	7,745	52	2469
E31/OAG12	52,6	2,5	1101	17,632	4,927	22	3757	25,900	6,857	48	3757
E10/OAG18	41,7	2,0	582	14,640	2,304	23	2002	21,431	4,327	48	2451
TEB/OAG18	43,7	2,5	880	19,262	8,036	28	2464	28,377	11,585	59	2916
TE/OAG20	45,0	2,0	850	18,315	1,356	23	3000	26,874	1,864	50	3000
TE/OAG22	55,0	3,0	1320	22,108	0,845	26	4580	32,517	1,499	55	4580
E21/OAG01	44,1	3,8	1438	22,364	5,319	24	2942	33,202	7,030	51	2942
TE/OAG05	42,1	3,0	729	20,223	2,151	24	2207	29,514	3,825	52	2476
E0019	31,6	1,8	1409	18,768	1,678	28	1580	22,616	1,481	61	1580
E0031	35,4	1,2	1274	15,367	1,481	28	1861	22,616	1,244	61	1861
E0231	25,7	2,8	900	22,616	5,697	27	1070	30,991	8,053	57	1070
E0246	30,1	1,2	905	14,070	1,524	27	1507	20,685	1,183	58	1507
E0435	31,5	1,2	890	14,209	2,721	28	1647	21,095	2,194	28	1647
E0535	25,4	1,2	1286	14,304	3,086	28	1060	21,186	4,214	60	1060
E0624	32,8	2,2	1292	19,540	4,219	28	1728	28,821	5,635	59	1728
E0631	28,1	2,2	1292	20,094	3,422	28	1336	29,683	4,564	60	1336
E0647	27,9	2,1	1028	12,002	5,368	22	1327	17,782	7,055	45	1327
E0674	34,6	1,2	956	9,824	4,261	23	1920	14,541	5,737	49	1920
E0720	31,3	0,8	1366	11,215	2,253	28	1563	16,839	3,441	60	1563
E0725	27,3	0,8	1366	11,215	2,253	28	1137	16,839	3,441	60	1137
E0773	27,7	3,0	1352	22,524	5,234	27	1320	33,203	7,004	58	1320
E0778	26,4	1,2	915	13,917	2,129	27	1102	20,540	3,811	58	1102
E0896	28,0	1,2	1286	14,162	3,350	28	1217	20,971	5,095	60	1217
E0926	25,1	2,0	1352	17,391	5,522	27	1047	25,769	7,701	57	1047
E1076	31,2	1,6	1250	17,584	1,397	28	1560	25,972	1,571	28	1560
E1200	33,8	2,2	1286	21,709	1,752	28	1691	31,870	1,450	60	1691
E1251	35,7	2,0	1300	17,166	3,476	26	1981	25,410	5,054	56	1981
E1297	33,0	1,6	1238	17,405	2,165	27	1835	25,919	3,749	59	1835
E1636	34,9	2,8	1348	20,044	7,769	26	1936	29,566	11,005	56	1936
E1693	44,5	3,3	1399	19,389	2,225	25	2970	28,546	2,603	52	2970
E1910	26,7	1,0	1287	11,259	3,722	27	1112	16,829	4,979	57	1112
E2000	25,8	1,4	915	15,216	4,596	28	1120	22,504	6,356	60	1120
E2136	32,8	2,0	938	15,703	3,820	25	1725	23,173	5,014	53	1725
E-1983	18,1	1,2	326	14,047	1,639	27	519	20,394	1,768	56	519
P338	31,3	1,2	1840	15,293	0,457	28	1492	22,807	0,516	61	1492
P21QA	52,3	3,2	1843	17,967	10,393	30	3263	26,426	14,183	63	4025
P23JA	55,8	4,0	1884	17,637	10,395	21	3973	25,997	13,888	45	4293
E009	37,2	2,1	1118	14,245	4,661	23	2479	21,000	6,781	50	2479
E017	38,8	3,8	811	20,979	3,479	23	2281	30,883	4,946	49	2281
E045	35,3	3,8	991	22,047	4,835	25	1960	32,465	6,016	53	1960
E051	36,0	2,5	779	17,347	3,813	24	2115	25,507	5,913	52	2115
E058	39,5	2,0	779	15,763	3,372	25	2323	23,080	5,570	53	2323
E066	38,7	2,3	775	16,119	4,603	24	2149	23,941	6,843	52	2149
E071	39,0	3,5	1009	22,585	4,474	26	2435	33,200	6,498	55	2435
E079	39,8	2,5	1369	19,574	7,489	27	2341	28,861	11,101	57	2341
E084	37,2	3,9	1046	19,037	5,012	23	2482	28,003	6,489	48	2482
E-54	22,5	1,0	554	9,721	0,876	22	900	14,363	1,606	46	900

Estaca	Obtido pelo Critério			$\eta=30\%$				$\eta=65\%$			
	W (kN)	H (m)	K (kN/mm)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência (%)	Res. Mob. (kN)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência (%)	Res. Mob. (kN)
P-2A	47,4	2,0	854	13,403	0,867	21	3389	19,749	2,051	46	3389
P-19B	39,8	2,0	854	10,984	6,373	21	2342	16,225	9,111	44	2342
P-24I	39,1	2,0	854	10,183	4,096	20	2301	15,037	5,527	42	2301
E08	24,9	1,2	613	11,245	1,132	24	1036	16,511	2,078	52	1036
E36	26,8	0,8	451	9,999	0,883	22	1165	14,638	1,210	49	1165
E41	25,2	1,2	601	12,901	0,863	23	1051	18,855	2,087	51	1051
E71	24,0	0,8	609	10,123	1,322	26	1001	15,066	2,342	56	1001
E75	26,9	1,2	618	11,623	2,546	25	1223	17,161	4,255	55	1223
E87	24,3	0,8	618	10,394	0,646	25	1013	15,404	0,685	55	1013
E-115	36,5	1,0	789	9,941	1,813	23	2146	14,810	2,663	49	2146
E03	28,0	1,2	621	6,790	0,190	19	1333	10,109	0,347	39	1333
E18	36,7	1,8	662	9,742	0,421	19	2161	14,521	0,694	40	2161
E24	31,1	1,5	495	9,495	0,433	21	1555	13,966	1,274	44	1555
E25	34,8	1,5	479	7,832	0,308	17	1932	11,546	1,005	35	1932
E61	38,2	1,0	1573	10,952	1,377	27	2244	16,228	2,386	57	2244
E68	38,7	1,0	1573	11,672	1,589	27	2417	17,432	2,193	58	2417
E187	37,5	1,5	1327	13,807	0,540	27	2346	20,371	0,817	57	2346
F4	14,7	4,8	436	14,419	5,081	19	410	21,239	8,319	41	410

Máximo	55,8	4,8	1884,0	22,6	10,4	30,0	4579,6	33,2	14,2	63,0	4579,6
Mínimo	14,7	0,8	326,0	6,8	0,2	17,0	409,6	10,1	0,3	28,0	409,6
Média	34,5	2,0	1038,1	15,5	3,3	25,0	1918,3	22,8	4,6	52,3	1961,0
Desvio padrão	8,5	1,0	366,5	4,3	2,4	2,9	817,5	6,2	3,2	7,5	866,8
Mediana	34,8	2,0	991,0	15,3	2,7	25,0	1920,0	22,6	4,3	53,0	1920,0

Quadro 20 – Resultados obtidos para o sistema de impacto e amortecimento definidos pela tendência dos dados

As mesmas relações para a obtenção do peso e relações semelhantes para a altura de queda foram simuladas para as estacas pertencentes ao banco de dados considerando a rigidez constante de 500 kN/mm.

Os resultados para a mobilização das resistências, dispostos no Apêndice G e no Quadro 21, foram os mesmos. No entanto, as tensões de compressão e tração diminuíram consideravelmente.

Para a eficiência do martelo de 30 %, passaram a apresentar tensões de compressão de 6,3 a 19,9 MPa e de tração de 0,2 a 6,1 MPa, 50 % abaixo de 2 MPa, no entanto semelhantes às encontradas nos ensaios realizados. A eficiência do sistema variou entre 15 e 29 %.

As resistências foram mobilizadas sob tensões aceitáveis para 53 % das estacas.



Estaca	Obtido pelo Critério		$\eta=30\%$				$\eta=65\%$			
	W (kN)	H (m)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência (%)	Resistência Mobilizada (kN)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência (%)	Resistência Mobilizada (kN)
E32/OAG07	38,5	4,0	19,097	3,649	23	1944	27,966	5,285	48	2264
E29/OAG10	46,6	2,5	18,050	0,682	21	3329	26,267	1,464	45	3329
E08/OAG11	42,0	2,5	14,374	4,344	20	2201	21,217	5,353	43	2469
E31/OAG12	52,6	3,0	15,512	3,532	18	3757	22,687	5,971	38	3757
E10/OAG18	41,7	2,0	14,036	1,323	22	1984	20,524	2,902	46	2451
TEB/OAG18	43,7	2,5	17,795	4,469	29	2530	26,174	6,681	62	2916
TE/OAG20	45,0	2,0	16,576	1,316	20	3000	24,177	2,059	43	3000
TE/OAG22	55,0	3,0	19,937	0,911	24	4580	29,071	1,384	52	4580
E21/OAG01	44,1	3,8	18,415	3,640	21	2942	27,126	5,005	45	2942
TE/OAG05	42,1	3,0	18,594	1,232	23	2199	27,033	1,120	49	2476
E0019	31,6	2,0	16,690	1,831	26	1580	24,527	2,442	56	1580
E0031	35,4	1,2	13,520	1,179	26	1861	19,630	1,118	56	1861
E0231	25,7	2,6	18,896	4,179	27	1070	27,693	6,138	57	1070
E0246	30,1	1,4	13,748	1,306	25	1507	20,040	0,854	54	1507
E0435	31,3	1,2	13,018	2,003	26	1647	19,202	1,571	56	1647
E0535	25,4	1,0	11,207	1,866	26	1060	16,461	2,789	55	1060
E0624	32,8	2,2	16,546	2,553	25	1728	24,241	3,619	54	1728
E0631	28,1	2,2	17,265	2,050	26	1336	25,330	2,928	55	1336
E0647	27,9	2,1	9,695	3,912	18	1327	14,310	5,258	38	1327
E0674	34,6	0,9	7,108	3,094	21	1920	10,470	3,866	43	1920
E0720	31,3	1,8	16,108	1,510	25	1563	24,044	2,022	54	1563
E0725	27,3	0,8	9,538	1,621	26	1137	14,118	2,252	55	1137
E0773	27,7	3,0	18,939	3,427	24	1320	27,807	4,726	52	1320
E0778	26,4	1,2	12,611	1,734	26	1102	18,456	2,642	54	1102
E0896	28,0	1,2	12,113	2,081	16	1217	17,746	3,380	54	1217
E0926	25,1	1,8	13,609	3,693	24	1047	19,981	5,272	50	1047
E1076	31,2	1,6	15,362	1,205	26	1560	22,477	1,468	56	1560
E1200	33,8	2,2	19,203	1,449	26	1691	27,934	1,253	55	1691
E1251	35,7	2,3	15,212	2,058	23	1981	22,239	3,170	48	1981
E1297	33,0	1,6	15,611	1,091	25	1835	23,035	1,967	54	1835
E1636	34,9	2,8	16,486	5,253	23	1936	24,171	6,834	49	1936
E1693	44,5	3,3	15,170	1,947	21	2970	22,170	1,730	44	2970
E1910	26,7	1,0	9,315	2,651	23	1112	13,834	3,651	49	1112
E2000	25,8	1,4	13,745	3,398	27	1120	20,197	4,852	57	1120
E2136	32,8	1,8	12,715	2,538	22	1725	18,701	3,524	47	1725
E-1983	18,1	1,2	14,837	1,542	28	519	21,702	2,771	60	519
P338	31,3	1,2	12,562	1,460	27	1492	18,490	1,368	57	1492
P21QA	52,3	4,4	11,490	5,528	15	3240	16,842	7,604	32	4025
P23JA	55,8	4,0	11,469	5,522	15	3926	16,783	7,500	32	4293
E009	37,2	2,1	11,460	2,530	19	2479	16,800	3,527	41	2479
E017	38,8	3,8	18,784	2,754	22	2281	27,562	1,940	45	2281
E045	35,3	3,8	18,784	2,754	22	1960	27,681	3,639	47	1960
E051	36,0	2,3	15,045	2,525	23	2115	22,058	3,561	48	2115
E058	39,5	2,3	15,357	2,755	23	2323	22,394	4,009	50	2323
E066	38,7	2,3	14,657	2,972	22	2149	21,654	5,248	47	2149
E071	39,0	3,8	19,728	1,687	22	2435	28,858	2,778	48	2435
E079	39,8	2,5	15,885	3,752	23	2341	23,255	6,040	49	2341
E084	37,2	4,2	16,120	3,164	19	2482	23,710	4,378	41	2482
E-54	22,5	0,5	6,625	0,605	21	900	9,880	0,955	45	900

Estaca	Obtido pelo Critério		$\eta=30\%$				$\eta=65\%$			
	W (kN)	H (m)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência (%)	Resistência Mobilizada (kN)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência (%)	Resistência Mobilizada (kN)
P-2A	47,4	2,3	12,650	0,680	18	3389	18,550	1,592	39	3389
P-19B	39,8	1,6	8,491	3,990	18	2342	12,540	5,920	38	2342
P-24I	39,1	2,0	8,542	2,533	17	2301	12,600	3,595	36	2301
E08	24,9	1,2	10,575	1,791	24	1036	15,507	2,199	52	1036
E36	26,8	0,8	9,809	1,249	25	1165	14,454	1,580	54	1165
E41	25,2	1,2	12,096	1,222	25	1051	17,663	1,277	54	1051
E71	24,0	0,8	9,533	2,177	27	1001	14,136	1,799	56	1001
E75	26,9	1,2	10,995	2,120	25	1223	16,213	3,383	54	1223
E87	24,3	0,8	9,717	1,818	26	1013	14,408	2,145	56	1013
E-115	36,5	1,0	8,909	0,776	21	2146	13,250	1,310	44	2146
E03	28,0	1,2	6,325	0,240	18	1333	9,396	0,458	37	1333
E18	36,7	1,8	8,814	0,440	18	2161	13,160	0,599	37	2161
E24	31,1	1,5	9,519	0,436	21	1555	14,004	1,274	44	1555
E25	34,8	1,5	7,948	0,331	17	1932	11,708	1,046	36	1932
E61	38,2	1,0	8,710	0,944	22	2244	12,692	1,582	47	2244
E68	38,7	1,0	9,623	0,868	22	2417	14,103	1,367	48	2417
E187	37,5	1,5	11,237	0,492	22	2346	16,491	0,776	46	2346
F4	14,7	4,8	15,064	6,057	20	410	22,173	9,854	42	410

Máximo	55,8	4,8	19,9	6,1	29,0	4579,6	29,1	9,9	62,0	4579,6
Mínimo	14,7	0,5	6,3	0,2	15,0	409,6	9,4	0,5	32,0	409,6
Média	34,5	2,1	13,5	2,3	22,6	1918,2	19,9	3,2	48,3	1961,0
Desvio padrão	8,5	1,0	3,7	1,4	3,3	815,9	5,4	2,0	7,0	866,8
Mediana	34,8	2,0	13,7	2,0	23,0	1920,0	20,0	2,8	48,0	1920,0

Quadro 21 – Resultados obtidos para o sistema de impacto definido pela tendência dos dados e rigidez de 500 kN/mm

Nota-se que um critério em que o peso do martelo é definido em função da magnitude da resistência homogeneiza os valores dos pesos dos martelos, prioriza a mobilização das resistências para uma baixa eficiência do martelo e mantém a eficiência do sistema dentro dos limites verificados.

Duas análises foram realizadas para a validação dos critérios: uma consta da obtenção de pesos do martelo, através das diversas relações testadas, para as estacas pertencentes à obra CEB (Quadro 22); outra consta da verificação e simulação da resistência estática antecipada para as estacas pertencentes à obra RGT (Quadro 23), na qual, o boletim de sondagem foi disponibilizado.

Para as estacas da obra CEB, nas quais se utilizou um peso de 31 kN durante o ensaio de carregamento dinâmico, foram verificados os pesos de martelo definidos a partir da resistência última, utilizando-se para X1 os valores de 1,5; 2,0 e

2,5 % e o valor dado pelo gráfico da Figura 51. Os resultados podem ser observados no Quadro 22.

Estaca	Ru (kN)	W (1,5 % Ru)	W (2,0 % Ru)	W (2,5 % Ru)	W (gráfico)
E0019	1579,7	23,7	31,6	39,5	31,6
E0031	1861,1	27,9	37,2	46,5	35,4
E0231	1069,6	16,0	21,4	26,7	25,7
E0246	1506,8	22,6	30,1	37,7	30,1
E0435	1646,7	24,7	32,9	41,2	31,5
E0535	1060,0	15,9	21,2	26,5	25,4
E0624	1727,5	25,9	34,6	43,2	32,8
E0631	1336,3	20,0	26,7	33,4	28,1
E0720	1562,5	23,4	31,3	39,1	31,3
E0725	1136,5	17,0	22,7	28,4	27,3
E0773	1320,3	19,8	26,4	33,0	27,7
E0778	1102,0	16,5	22,0	27,6	26,4
E0896	1216,5	18,2	24,3	30,4	28,0
E0926	1046,6	15,7	20,9	26,2	25,1
E1076	1560,1	23,4	31,2	39,0	31,2
E1200	1691,4	25,4	33,8	42,3	33,8
E1251	1981,4	29,7	39,6	49,5	35,7
E1297	1834,5	27,5	36,7	45,9	33,0
E2000	1119,7	16,8	22,4	28,0	25,8

Máximo	29,7	39,6	49,5	35,7
Mínimo	15,7	20,9	26,2	25,1
Amplitude	14,0	18,7	23,4	10,6
Média	21,6	28,8	36,0	29,8
Desvio Padrão	4,6	6,1	7,7	3,5
Mediana	22,6	30,1	37,7	30,1

Quadro 22 – Obtenção do peso do martelo para as estacas da obra CEB

Verifica-se uma homogeneização dos valores obtidos através da Figura 51 em comparação com os obtidos por critérios fixos, para os quais as diferenças entre o maior e o menor peso definido a partir da resistência última tendem a ser maiores. Além disso, o valor médio, igual a 29,8 kN, é o que mais se aproxima do peso utilizado nos ensaios, seguido pelo peso obtido para  $X1 = 2,0 \%$ .

A fim de verificar a resistência estática antecipada, as estacas pertencentes à obra RGT foram simuladas para o peso determinado pelo gráfico da Figura 51, altura de queda igual a 3 vezes o diâmetro, e valor intermediário de rigidez, de 500 kN/mm. A resistência estática antecipada foi calculada, a partir da sondagem disponível nos relatórios, pelos métodos de Aoki-Velloso, resultando em 1060 kN, e

por Decourt-Quaresma, dada por 940 kN. Para a realização das simulações adotou-se o valor intermediário, de 1000 kN. Os resultados podem ser observados no Quadro 23.

Estaca	Obtido pelo Critério		$\eta=30\%$				$\eta=65\%$			
	W (kN)	H (m)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência (%)	Resistência Mobilizada (kN)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência (%)	Resistência Mobilizada (kN)
E08	24,5	1,2	10,697	1,136	23	1000	15,671	2,093	50	1000
E32	24,5	1,2	11,930	0,612	24	1000	17,496	1,575	51	1000
E33	24,5	1,2	11,293	0,809	24	1000	16,625	1,418	52	1000
E36	24,5	1,2	11,918	0,585	23	1000	17,503	1,537	51	1000
E41	24,5	1,2	12,506	0,716	22	1000	18,193	2,408	49	1000
E70	24,5	1,2	12,817	0,683	25	951	18,881	0,727	54	1000
E71	24,5	1,2	12,205	1,412	26	1000	17,937	3,104	55	1000
E73	24,5	1,2	10,983	1,247	24	1000	16,093	1,974	52	1000
E74	24,5	1,2	9,510	1,170	22	1000	13,993	2,477	47	1000
E75	24,5	1,2	10,766	3,097	24	1000	15,890	5,498	53	1000
E87	24,5	1,2	12,409	0,735	24	1000	18,320	1,132	53	1000

Quadro 23 – Simulações para as estacas da obra RGT

O peso determinado pelo critério (24,5 kN) é maior do que o utilizado no ensaio. No entanto, apenas uma estaca não foi levada à ruptura para a eficiência de 30 %. A realização de um novo golpe é possível e faz-se necessária. Caso se utilize de um valor fixo para X1, os valores de 2,0 e 2,5 % mostram-se mais atrativos.

Em geral, para as relações testadas têm-se dois enfoques principais: quanto à mobilização das resistências (Quadro 24) e quanto às tensões de compressão e tração provocadas pelo impacto (Quadro 25).

		W = 2 % Ru		W = f (Ru)	
		H = 4 D		H = 2 a 5D	
		k = 0,25 L/D	k = 500 kN/mm	k = f (L/D)	k = 500 kN/mm
Mobilização das Resistências	$\eta = 30 \%$	64%	64%	90%	90%
	$\eta = 65 \%$	96%	96%	100%	100%

Quadro 24 – Enfoque quanto à mobilização das resistências

		W = 2 % Ru		W = f (Ru)	
		H = 4 D		H = 2 a 5D	
		k = 0,25 L/D	k = 500 kN/mm	k = f (L/D)	k = 500 kN/mm
Tensões de Compressão	Intervalo (MPa)	10,4 a 19,8	7,7 a 18,7	6,8 a 22,6	6,3 a 19,9
	< 20 Mpa	100%	100%	82%	100%
Tensões de Tração	Intervalo (MPa)	0,4 a 8,3	0,4 a 5,0	0,2 a 10,4	0,2 a 6,1
	< 2 Mpa	57%	66%	36%	50%

Quadro 25 – Enfoque quanto às tensões provocadas pelo impacto para a eficiência de 30 %

Convém ressaltar que para a eficiência do martelo de 30 % as resistências foram mobilizadas sob tensões aceitáveis para: 42 % das estacas com  $W = 2 \% Ru$  e rigidez variável; 45 % das estacas com  $W = 2 \% Ru$  e rigidez constante; 35 % das estacas com peso definido em função da magnitude das resistências e rigidez do amortecimento variável; e, 53 % das estacas com peso definido em função da magnitude das resistências e rigidez do amortecimento constante.

Percebe-se que o critério no qual a obtenção do peso do martelo é dada em função da resistência última prioriza a mobilização das resistências, enquanto que nos critérios cujas relações utilizadas para a seleção do sistema de impacto e amortecimento são fixas, as tensões se mostram inferiores. No entanto, a mobilização das resistências é o fator mais relevante. E, em todo caso, uma rigidez intermediária aos valores verificados nas etapas precedentes se faz necessária, a fim de amenizar as tensões provocadas pelos golpes.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1 CONCLUSÕES

Das diversas simulações realizadas neste estudo conclui-se que os martelos utilizados nos ensaios possuem uma eficiência entre 30 e 65 %, tendendo ao limite inferior. Trata-se de um valor baixo quando comparado aos sugeridos na literatura para martelos de queda livre ou aos valores referentes aos martelos industrializados.

Para o último golpe, a eficiência do martelo é, em média, cerca de 10 a 12 % superior à eficiência do sistema. A eficiência do sistema de cravação possui valores representativos para o intervalo compreendido entre 20 e 50 %, tendendo ao valor inferior.

A rigidez do amortecimento consta, em sua maioria, de valores inferiores a 3000 kN/mm, com 70 % dos casos abaixo de 1200 kN/mm. Esses valores são relativamente menores aos relacionados a cepos de madeiras rijas, usualmente utilizadas. Isto se deve ao fato de serem constituídos basicamente por chapas de madeira compensada.

O coeficiente de restituição do amortecimento não apresentou tendência clara, variando de 0,1 a 0,9. No entanto, apresentam o valor médio de 0,5, condizente com a literatura.

As análises realizadas mostram-se consistentes com tendências de comportamento que podem ser inferidas a partir dos mecanismos básicos do fenômeno de propagação das ondas. As tensões de compressão aumentam com o aumento do peso do martelo, da altura de queda, da rigidez e da eficiência do martelo. Enquanto as tensões de tração tendem a diminuir com o aumento do peso do martelo e a aumentar com o aumento da altura de queda, da rigidez e da eficiência do martelo.

Menores pesos de martelo, além de tenderem a danificar a estaca por tensões de tração, podem não mobilizar a resistência desejada. Já os maiores pesos podem causar danos por tensões de compressão. Geralmente, essas características estão ligadas a uma rigidez mais alta do amortecimento.

Baixas alturas de queda podem não mobilizar a resistência desejada. Enquanto as maiores mobilizam a resistência mais facilmente, porém, podem causar danos por tensões de tração e compressão, principalmente quando associadas aos amortecimentos mais rígidos.

Uma baixa rigidez do amortecimento pode não mobilizar a resistência quando combinadas a baixas eficiências do martelo. Já uma maior rigidez pode provocar danos por tensões de tração.

Uma rigidez da ordem de 500 kN/mm faz-se necessária a fim de amenizar as tensões estruturais provocadas pelo golpe do martelo e, de acordo com os resultados obtidos pode ser aplicada à estacas de diferentes geometrias.

A proposta de um critério cujas características do sistema de impacto e amortecimento sejam selecionadas a partir de relações fixas torna-se uma tarefa difícil perante as particularidades do solo.

Os critérios baseados em relações fixas testados para a seleção do sistema de impacto e amortecimento priorizam a mobilização das resistências apenas se eficiências do martelo mais altas se materializarem no campo.

Além disso, em alguns casos, onde o peso do pilão obtido como percentagem da resistência última for muito baixo ou muito alto, faz-se necessária a imposição de pesos limites. Os pesos de 15 e 80 kN podem ser utilizados desde que as condições sejam semelhantes às das estacas pertencentes ao banco de dados.

Para resistências relativamente altas é possível utilizar uma percentagem menor da resistência última. No entanto, quando se espera uma baixa capacidade de carga, uma percentagem menor não conduzirá a um peso satisfatório. Neste caso, é possível utilizar percentagens mais altas da resistência última para a obtenção do peso do martelo, sem maiores ônus à obra.

Um critério baseado nessas premissas, a partir da tendência apresentada pelos dados de ensaio estudados, homogeneíza os valores dos pesos dos martelos e prioriza a mobilização das resistências tanto para uma baixa eficiência do martelo, quanto para uma alta eficiência. Neste caso, não se faz necessária a imposição de limites para os pesos.

Em todas as simulações as tensões de tração se constituíram no maior limitador dos resultados. Entretanto, em muitos casos, durante a retro-análise, por exemplo, verifica-se que as tensões resultantes do estudo realizado através da

Equação da Onda são superiores às medidas nos ensaios. De qualquer forma, as tensões podem ser controladas durante a execução do ensaio.

Como sugestão para estudos de cravabilidade, é plausível a consideração de dois cenários, definidos por valores de baixa e alta eficiência. Caso em que se podem utilizar os valores de 30 e 65 %. Na consideração de apenas uma eficiência, valores da ordem de 50 % podem ser utilizados. Para a relação entre a resistência lateral e a resistência última, é aceitável adotar um valor da ordem de 60 a 65 %. Estes valores são pertinentes às estacas pertencentes ao banco de dados.

No entanto, o conhecimento prévio de características do comportamento dinâmico do solo em questão torna-se importante na seleção apropriada do sistema de cravação. Quanto maior o valor de *quake*, maior deve ser a energia potencial necessária para mobilizá-lo.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se a realização de ensaios de carregamento dinâmico em estacas testes, a fim de verificar a eficácia dos resultados obtidos por simulação na prática.

Sugerem-se também estudos mais detalhados a respeito das características do amortecimento. A espessura do amortecimento se constitui em uma variável que pode ser diretamente manipulada. Além disso, as influências do coeficiente de restituição devem ser verificadas.

Um estudo semelhante deve ser realizado abordando diferentes características de estacas, parâmetros do solo e capacidade de carga antecipada por método de cálculo.

No banco de dados são encontradas tensões ligeiramente superiores as pré-estabelecidas. De acordo com os resultados dos ensaios estudados é possível adotar como tensão de compressão limite o valor de 25,0 MPa e como tensão de tração o valor de 3,0 MPa. No entanto, deve-se realizar um estudo mais aprimorado, verificando as relações existentes entre as tensões, a resistência mobilizada e a energia transferida durante os golpes.



As combinações foram testadas para o último golpe. Durante o ensaio, uma seqüência de golpes deve ser efetuada, de acordo com o método de energia crescente proposto por Aoki (1989; 2000). Hussein *et al.*, (1996) cita a utilização de 2 a 4 golpes na realização do ensaio. No banco de dados encontramos ensaios cujo número de golpes varia de 1 a 18. A realização de um único golpe não é suficiente para determinar uma curva resistência versus deslocamento, comumente empregada na avaliação da capacidade de carga de fundações. Por outro lado, um número excessivo de golpes pode prejudicar o desempenho da estaca, visto que pode ocorrer uma degradação de resistências, com o sistema tendendo a entrar em um regime de cravação. Estima-se, com base na análise do banco de dados, que a realização de 4 a 6 golpes, durante um ensaio de qualidade, seja suficiente na avaliação das cargas mobilizadas. No entanto, as relações entre os diversos parâmetros envolvidos no processo devem ser apuradas. Sugere-se o estudo da determinação de uma seqüência de número de golpes e alturas de queda que culmine nos valores esperados para o último golpe analisados nesta pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e Execução de Fundações – Procedimento. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484**: Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e Segurança nas Estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12131**: Estacas - Prova de carga estática - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13208**: Estacas – Ensaio de Carregamento Dinâmico. Rio de Janeiro, 2007.

ABEF. **Manual de Especificações de Produtos e Procedimentos ABEF**. São Paulo: Pini, 2004.

ALONSO, U. R. **Previsão e Controle das Fundações**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1991.

ANTONIUTTI NETO, L. *et al.* Tomografia de estacas: uma nova tecnologia para o controle de qualidade de fundações profundas. In: SEFE V - Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, 2004, São Paulo. **SEFE V** - Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia. São Paulo: ABMS, 2004. v. 2. p. 341-347.

AOKI, N. Discussion on Driveability of Piles. **Proceedings of International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. Rio de Janeiro, Discussion Session 15, 2977-2978. Rotterdam: Balkema, 1989.

AOKI, N. Keynote lecture: Improving the reliability of pile bearing capacity by the Dinamic Increasing Energy Test (DIET). **Proceedings of Sixth International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles. Application of Stress Wave Theory to Piles – Quality Assurance on Land and Offshore Piling**, São Paulo, SP. Rotterdam: Balkema, v.1, p. 635-650, 2000.

BEIM, J.W., *et al.* Tomography: A New Technology for Quality Control of Deep Foundations. **GEO3 Construction Quality Assurance/Quality Control Technical Conference**: Dallas/Ft. Worth, TX; 323-328. November, 2005.

BEREZANTSEV, V. G.; KHRISTTOFOROV, V. S. GOLUBKOV, V. N. Load Bearing Capacity and Deformation of Piled Foundations. **Comptes Rendus du 5<sup>e</sup> Congrès International de Mécanique des Sols et des Travaux de Foundations**. Paris, 1961.

BERNARDES, G. P. **Dynamic and Static Testing of Large Model Piles in Sand**. Tese de Doutorado, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Noruega, 1989.

CHELIS, R. D. **Pile Foundations. Theory – Design – Practice**. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1951.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. **Carga Admissível em Fundações Profundas**. São Carlos: EESC-USP, 1999.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. Tradução da 6<sup>a</sup> edição norte-americana. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DANZIGER, B. R. *et al.* A Discussion on the Uniqueness of CAPWAP-type Analyses. **Proceedings of the Fifth International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles 1996**: Orlando, p. 394-408, 1996.

DÉCOURT, L. Relato Geral. Primeira Sessão Técnica: Fundações e Interação Solo-Estrutura. **X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações**. Foz de Iguaçu, 1994.

DÉCOURT, L. A Ruptura de Fundações Avaliada com Base no Conceito d Rigidez. **SEFE III**, São Paulo, 1996.

DÉCOURT, L.; ALBIERO, J. H.; CINTRA, J. C. A. Análise e Projeto de Fundações Profundas. In: HACHICH, W. *et al.* **Fundações: Teoria e Prática**. São Paulo: Pini, 1998. p. 265-327. Capítulo de Livro.

DE BEER, E. E. Different Behavior of Bored and Driven Piles. **Proc. of 1<sup>st</sup> Inter. Geoth. Seminar on Deep Foundation on Bored and Auger Piles**. Ghent, 1988.

DYMINSKI, A. S. **Análise de Problemas Geotécnicos Através de Redes Neurais**. Tese. Departamento de Engenharia Civil da PUC/Rio. Rio de Janeiro, 2000.

EUROCÓDIGO 7. **Eurocódigo 7: Projecto Geotécnico. Parte 1: Regras Gerais**. Instituto Português da Qualidade, 1999.

GOBLE, G. G.; RAUSCHE, F. **Wave Equation Analysis of Pile Driving, WEAP Program**. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC. Report FHWA-IP-76-13, 1976.

GOBLE, G. G., RAUSCHE, F. Pile Driveability Predictions by CAPWAP. **Institution of Civil Engineers**. Numeric Methods in Offshore Piling: London, England; 29-36, 1979.

GOBLE, G. G. ; LINKINS, JR. G. ; RAUSCHE, F. The Analysis of Pile Driving – A State of Art. **Seminar on Application of Stress-Wave Theory on Piles**, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1980.

GOBLE, G. G.; RAUSCHE, F. Wave Equation Analysis of Pile Driving - WEAP Program. **US Department of Transportation Federal Highway Administration Offices of Research and Development**: Washington, D.C.; 1-114, 1981.

GONÇALVES, C. ; ANDREO, C. S. ; BERNARDES, G. P. **Ensaio de Carregamento Dinâmico**. 1. ed. São Paulo, 1996.

GONÇALVES, C. ; ANDREO, C. S. ; BERNARDES, G. P. ; FORTUNATO, S. G. S. **Controle de Fundações Profundas Através de Métodos Dinâmicos**. 1. ed. São Paulo, 2000.

GRAVARE, C. J. ; GOBLE, G. G. ; RAUSCHE, F. ; LINKINS, JR. G. Pile Driving Construction Control by the Case Method. **Ground Engineering**: United Kingdom, 1980.

HEAD, K. H. **Manual of Soil Laboratory Testing**. Pentech Press: London, 1994.

HIRSCH, T. J.; LOWERY, L. L.; CARR, L. **Pile Driving Analysis - Wave Equation Users' Manual, TTI Program**. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC. Report FWHA-IP-76-14, 1976.

HUSSEIN, M. ; LINKINS, G. ; RAUSCHE, F. Selection of a Hammer for High-Strain Dynamic Testing of Cast-in-place Shafts. **Proceedings of the Fifth International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles 1996**: Orlando, FL; 759-772, 1996.

HUSSEIN, M.H.; LINKINS, G. E. Deep Foundations Quality Control and Assurance Testing Methods. **Florida Engineering Society Journal**, 2005.

IN SITU GEOTECNIA. **Relatório Técnico**. 2005.

KORMANN, A. C. M. **Comportamento de estacas durante a cravação em areia calcária**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1993.

KORMANN, A. C. M. *et al.* Behavior of Short CFA Piles in an Overconsolidated Clay Based on Static and Dynamic Load Tests. **Proceedings of the Sixth International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles 2000**: São Paulo, BR; 707-714, 2000.

KORMANN, A. C. M. Ensaio de Integridade de Estacas (PIT) – Conceitos Básicos. **Workshop Controle de Qualidade de Fundações através de Provas de Carga Dinâmicas e Verificação de Integridade Estrutural**, Sinduscon-SP e ABMS. São Paulo, 2002.

KORMANN, A. C. M.; DEBAS, L. F.; ANTONIUTTI NETO, L. Ensaio de Carregamento Dinâmico: Caso de Obra com Estacas Hélice Contínua. In: **I Simpósio de Geotecnia do Centro Oeste**, 2003, Cuiabá. I Simpósio de Geotecnia do Centro Oeste. Cuiabá : CEFET-MT, 2003.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1969.

LIKINS, G. E.; HUSSEIN, M.H. High-Strain Dynamic Testing of Drilled and Cast-In-Place Piles. **Deep Foundations Institute, 20th Annual Members Conference and Meeting**: Charleston, South Carolina, p. 127-142, 1995.

LIKINS, G. E.; RAUSCHE, F.; THENDEAN, G.; SVINKIN, M. CAPWAP Correlation Studies. **Fifth International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles**: Orlando, Florida, p. 447-464, 1996.

LIU, C.; LIN, Q.; SHI, F. Determining the Bearing Capacity of Larger-Diameter Cast-in-Situ Piles by High-Strain Pile-Testing. **Fifth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles**: Orlando, Florida, p. 797-804, 1996.

LOWERY, L. L. ; HIRSCH, T. J.; EDWARDS, T. C.; COYLE, H. M.; SAMSON, C. H. Pile Driving Analysis – State of the art, **Texas Transportation Institute**, Research Report 33-13, 1969.

MARCELLI, M. **Sinistros na Construção Civil**. Pini: São Paulo, 2008

MAIA, C. M. M., *et al.* Execução de Fundações Profundas. In: HACHICH, W. *et al.* **Fundações: Teoria e Prática**. São Paulo: Pini, 1998. p. 329-407. Capítulo de Livro.

MEYERHOF, G. G. The ultimate bearing capacity of foundations. **Geotechnique**, Vol. II, p. 301, 1951.

MIDDENDORP, P.; VERBEEK, G. E. H. 30 Years of Experience with the Wave Equation Solution Based on the Method of Characteristics. **Geotechnical Engineering in the Information Technology Age**, Atlanta, GA, 2006.

MILITITSKY, J.; CONSOLI, N. C.; SCHNAID, F. **Patologia das Fundações**. Oficina de Textos: São Paulo, 2005.

NAVAJAS, S.; NIYAMA, S. Ensaio de Carregamento Dinâmico em Estacas Moldadas *In Loco* numa Obra Portuária. **Terceiro Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia**: São Paulo, Vol 1, p. 331- 342, 1996.

NIYAMA; S. *et al.* Instrumentação e Monitoração do Teste de Cravação de uma Estaca num Solo Calcário na Bacia de Curimã, Ceará. **VII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações**. Olinda, Recife, 1982a.

NIYAMA. S. *et al.* Técnicas de Monitoração e de Análise da Cravação Dinâmica de Estacas. **VII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações**. Olinda, Recife, 1982b.

NIYAMA, S. Introdução de Ensaio Dinâmico nas Obras de Fundações no Brasil – Breve Histórico. **Workshop: Controle de Qualidade de Fundações Através de PDA e PIT**. São Paulo: 2002.

NIYAMA, S.; AOKI, N.; CHAMECKI, P. R. Verificação de Desempenho. In: HACHICH, W. *et al.* **Fundações: Teoria e Prática**. São Paulo: Pini, 1998. p. 723-751. Capítulo de Livro.

PAIKOWSKY; S. G.; CHERNAUSKAS, R. L. Soil Inertia and the Use of Pseudo Viscous Damping Parameters. **Proceedings of the Fifth International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles 1996**: Orlando, FL; 759-772, 1996.

PAIKOWSKY; S. G. **Innovative Load Testing Systems**. Transportation Research Board, 2006.

PDI. **GRLWEAP Wave equation analysis of pile driving: Procedures and models**. Pile Dynamics, Inc.: Cleveland, 2002.

PDI. **Provas Dinâmicas e Instrumentação Engenharia Ltda - PDI Engenharia**. Acessado em 06/09/2008. Disponível em <http://pdi.com.br/>.

PINTO, C. S. Propriedades dos Solos. In: HACHICH, W. *et al.* **Fundações: Teoria e Prática**. São Paulo: Pini, 1998. p. 51-118. Capítulo de Livro.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PILEWAVE™. **Simulation of Wave Propagation in Pile**. Version 4.1.0. Pile Test, 2006.

PRESA, E. P.; POUSADA, M. C. **Retrospectiva e técnicas modernas de fundações em estacas**. Salvador: ABMS-NRBA, 2001.

RAUSCHE, F. ; LIKINS, G. E. ; HUSSEIN, M.H. Pile Integrity by Low and High Strain Impacts. **Third International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles**: Ottawa, Canada; 44-55. May, 1988.

RAUSCHE, F. ; LIKINS, G. E.; REN-KUNG, S. Pile Integrity Testing and Analysis. **Proceedings of the Fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles**: The Netherlands; 613-617. September, 1992.

RAUSCHE, F. **Wave Equation Analysis – What it Can and Cannot Do**. Newsletter, 1999.

RAUSCHE, F., KLESNEY, A. Hammer Types, Efficiencies and Models in GRLWEAP. **PDCA 11th Annual International Conference and Exposition**: Nashville, TN; 97-118. 2007.

REESE, L. C.; ISENHOWER, W. M.; WANG, S. **Analysis and Design of Shallow and Deep Foundations**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006.

SCHNAID, F. **Ensaio de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

SEIDEL, J.; RAUSCHE, F. Correlation on Static and Dynamic Pile Tests on Large Diameter Drilled Shafts. **Proceedings of the Second International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles**, p. 313-318, 1984.

SEITZ, J.M. Dynamic Testing of Bored Piles in Non-cohesive Soils. **Proceedings of the Second International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles**, p. 201-209, 1984.

SKEMPTON, A. W. The Bearing Capacity of Clays. **Proc. Building Research Congress**. London, p. 180-189, 1951.

SMITH, E. A. L. Pile Driving Analysis by the Wave Equation. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, N.SM4**, august – Vol. 86, p. 35-61, 1960.

UTO, K.; FUYUKI, M.; SAKURAI, M. An Equation for the Dynamic Bearing Capacity of Pile Base on Wave Theory. **Proc. Int. Symp. On Penetrability and Drivability of Piles, San Francisco**, pp. 95 -100, 1985.

VAN LUIPEN, P.; JONKER, G. Post-analysis of full-scale pile driving tests. **Numerical Methods in Offshore Piling, Institution of Civil Engineers**. Londres, p. 43-45, 1980.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. Concepção de Obras de Fundações. In: HACHICH, W. *et al.* **Fundações: Teoria e Prática**. São Paulo: Pini, 1998. p. 211-226. Capítulo de Livro.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações: Critérios de Projeto, Investigação do Subsolo, Fundações Superficiais**. Rio de Janeiro: Oficina de Textos, 2004.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações: Fundações Profundas**. Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ, 2002.

WARRINGTON, D. C. A new type of Wave equation Analysis program. **Third international conference on the application of stress-wave theory to piles**, Ottawa, p. 25-27, 1988.

WOLLE, C. M.; HACHICH, V. F. Requisitos da Qualidade das Fundações. In: HACHICH, W. *et al.* **Fundações: Teoria e Prática**. São Paulo: Pini, 1998. p. 693-721. Capítulo de Livro.

## **APÊNDICE A**

### **RESUMO DOS RESULTADOS DE ECD EM ESTACAS MOLDADAS *IN LOCO***



Obra	Estaca	Tipo	D (cm)	W (kN)	H (m)	L (m)	Lp (m)	Area (cm²)	E (MPa)	I (kNm²)	RmK (kN)	RI (kN)	Rp (kN)	RIRu (%)	Quake (mm)	Damping (s/m)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	DMK (mm)	Nega (mm)	Ep (kNm)	BMK		
ARH-01	E0300 AG02	HC	50	40.5	2.4	23.0	21.8	1999.2	28291.0	24	2362.4	1810.6	551.8	76.6	4.214	4.260	1.500	1.350	0.6	9.2	1.5	97.2	22.7	
	E3200 AG06	HC	50	40.5	3.4	21.6	20.6	2088.6	28291.0	24	2661.6	1726.0	935.5	64.8	2.744	6.190	1.321	1.489	2.3	1.3	12.7	7.0	137.7	42.4
	E3200 AG07	HC	50	40.5	2.8	14.5	13.1	2062.7	25060.5	24	226.4	958.8	1305.5	42.3	1.814	16.300	0.122	1.191	18.5	0.2	19.7	10.0	113.4	43.2
	E2900 AG10	HC	50	50.0	3.2	22.5	21.1	2037.2	31717.3	24	3329.4	2772.9	566.6	83.3	1.470	4.270	0.532	1.313	30.2	2.4	13.5	5.0	160.0	56.8
	E0800 AG11	HC	50	50.0	3.2	23.4	21.9	2521.4	33503.8	24	2488.5	1559.0	909.5	63.2	9.397	6.400	1.040	1.488	26.6	1.7	15.1	7.0	160.0	83.3
	E3100 AG12	HC	50	50.0	3.2	23.5	22.1	3088.6	33503.8	24	3756.5	2266.6	519.9	86.2	2.078	6.810	0.578	1.311	20.4	1.8	12.3	4.0	160.0	47.5
	E1000 AG18	HC	50	50.0	1.8	12.7	11.4	2239.6	33503.8	24	2451.0	761.0	1690.0	31.0	1.210	13.950	0.094	0.377	17.2	1.0	19.6	10.0	90.0	40.4
	TEB00 AG18	HC	50	50.5	2.2	14.7	13.4	2409.0	33503.8	24	2915.6	1546.3	1369.3	53.0	6.403	17.200	0.080	0.692	18.6	1.0	20.3	10.0	111.1	50.7
	TE00 AG19	HC	50	40.5	1.8	24.6	23.2	2087.9	28291.0	24	2287.6	1566.9	720.8	68.5	1.491	7.460	0.658	0.636	21.0	3.1	10.8	5.0	72.9	36.1
	TE00 AG20	HC	50	40.5	2.0	14.5	13.5	1986.0	28291.0	24	2999.9	2299.1	700.8	76.6	2.269	3.870	0.802	0.460	17.6	0.1	6.9	1.5	81.0	16.8
	TE00 AG21	HC	50	40.5	3.6	19.5	18.2	3484.0	28291.0	24	2701.4	1074.3	1627.1	39.8	7.477	7.440	0.344	0.852	11.7	1.0	14.1	6.0	145.8	36.8
	TE00 AG22	HC	50	40.5	2.6	19.6	18.3	2354.3	25060.5	24	4679.6	3508.2	1071.4	76.6	2.889	4.420	0.561	0.775	23.2	0.0	11.1	2.0	105.3	37.7
BGA-01	E2100 AG01	HC	50	50.0	2.0	22.5	21.2	2782.4	28291.0	24	2942.1	2524.9	417.2	85.8	3.860	5.700	1.584	1.317	16.4	1.1	8.0	3.0	100.0	24.3
	TE00 AG05	HC	50	50.0	2.0	14.2	12.8	1936.6	28291.0	24	2475.9	1398.3	1077.6	56.5	1.000	13.980	0.133	1.162	19.5	0.6	16.8	7.0	100.0	39.5
	B9a - oeste	RAIZ	30	22.0	1.8	11.5	10.0	706.0	25540.8	23	1950.7	1706.2	244.5	87.5	3.168	3.290	0.416	0.632	25.8	2.0	8.4	1.0	39.6	11.2
	B0019	HC	40	31.0	1.2	18.8	16.4	1244.0	25060.5	24	1579.7	769.3	810.4	48.7	2.348	6.580	0.718	0.646	25.0	2.3	9.2	3.0	37.2	20.5
	B0031	HC	40	31.0	1.5	20.8	18.4	1304.5	25060.5	24	1861.1	1237.1	624.0	66.5	1.000	3.260	0.247	0.871	26.7	1.6	11.1	3.0	46.5	27.6
	B0231	HC	40	31.0	1.5	18.4	16.4	1274.1	25060.5	24	1069.6	628.8	440.8	58.8	1.651	9.390	0.830	0.874	22.4	6.7	9.0	3.0	46.5	18.9
	B0246	HC	40	31.0	1.1	18.3	15.8	1346.0	25060.5	24	1506.8	688.3	538.5	64.3	1.000	4.440	0.430	1.293	23.3	1.7	8.2	3.5	34.1	18.3
	B0436	HC	40	31.0	1.5	18.6	16.9	1266.0	25060.5	24	1646.7	664.6	982.1	40.4	3.241	5.200	0.662	0.307	26.4	3.2	11.6	5.0	46.5	26.9
	B0535	HC	40	31.0	1.2	20.6	17.0	1256.0	25060.5	24	1060.0	311.7	748.3	29.4	1.000	5.090	1.070	0.737	22.5	2.6	9.8	4.0	37.2	18.5
	B0624	HC	40	31.0	1.7	20.5	18.0	1461.0	25060.5	24	1727.5	598.0	1129.5	34.6	1.849	7.820	0.657	0.628	23.5	2.2	11.9	4.5	52.7	26.5
	B0631	HC	40	31.0	1.3	20.5	18.0	1244.0	25060.5	24	1336.3	435.3	901.0	32.6	1.000	7.060	1.266	0.677	21.7	1.5	9.1	3.0	40.3	17.3
	B0647	HC	60	51.0	1.8	17.4	14.9	3027.5	25060.5	24	1327.4	713.5	613.9	53.8	2.556	5.340	1.333	1.495	12.0	1.5	5.9	2.0	91.8	14.0
CEB-05	B0674	HC	60	51.0	2.0	18.7	16.4	2873.0	25060.5	24	1920.0	799.7	1120.3	41.7	2.257	4.070	0.588	0.520	12.4	2.8	8.2	3.0	102.0	16.5
	B0720	HC	40	31.0	1.4	20.3	17.4	1346.0	25060.5	24	1562.5	1464.6	107.9	93.1	4.700	5.990	1.099	1.493	24.8	2.7	8.0	1.0	43.4	19.0
	B0725	HC	40	31.0	1.7	19.4	16.9	1387.3	25060.5	24	1136.5	704.9	431.6	62.0	3.840	1.760	0.535	0.798	16.8	2.0	9.3	3.0	52.7	14.1
	B0744	HC	40	31.0	1.1	18.6	16.2	1194.0	25060.5	24	599.3	453.8	145.5	75.7	2.852	6.380	0.898	1.304	14.5	2.4	8.6	2.0	34.1	8.5
	B0773	HC	40	31.0	1.5	19.6	16.9	1429.6	25060.5	24	1320.3	645.2	675.1	48.9	2.077	8.330	1.119	0.846	25.2	2.3	9.7	3.0	46.5	24.2
	B0778	HC	40	31.0	0.9	18.1	15.6	1264.0	25060.5	24	1102.0	668.6	433.4	60.7	1.000	5.240	0.779	0.619	22.8	3.7	10.5	5.0	27.9	22.8
	B0896	HC	40	31.0	1.2	20.6	18.0	1385.0	25060.5	24	1216.5	570.0	646.5	46.9	1.000	5.490	0.870	0.577	22.9	3.7	9.8	2.8	37.2	21.3
	B0926	HC	40	31.0	0.7	19.6	17.5	1529.0	25060.5	24	1046.6	417.2	629.4	39.9	1.280	6.410	1.739	0.586	16.8	3.2	6.8	2.0	21.7	13.0
	E1076	HC	40	31.0	0.9	21.2	18.8	1224.8	25060.5	24	1580.1	740.2	819.9	47.4	1.001	5.110	0.882	0.942	22.6	3.3	8.5	3.0	27.9	17.2
	E1200	HC	40	31.0	1.0	20.6	17.6	1224.2	25060.5	24	1691.4	1090.0	601.4	64.4	1.000	6.350	0.697	0.835	24.7	1.9	8.7	2.0	31.0	18.7
	E1251	HC	50	31.0	1.5	19.9	17.5	1964.0	25060.5	24	1981.4	1540.8	440.6	77.8	2.341	5.530	0.956	0.960	23.8	1.8	7.8	2.5	46.5	25.7
	E1297	HC	40	31.0	1.0	21.4	18.9	1304.5	25060.5	24	1834.5	1648.3	190.2	89.6	3.451	4.930	0.839	0.161	23.3	2.5	7.9	2.0	31.0	17.1
FDS-06	E1636	HC	50	51.0	1.1	19.2	16.3	1936.0	25060.5	24	1936.3	1098.6	837.8	56.7	2.800	9.150	0.980	0.219	22.3	4.4	12.3	4.0	56.1	30.5
	E1693	HC	60	51.0	1.7	21.3	18.6	2873.0	25060.5	24	2969.8	1287.8	1702.0	42.7	1.039	5.860	1.200	0.858	20.1	2.9	7.6	3.0	86.7	32.0
	E2000	HC	50	51.0	1.4	20.1	17.6	1790.0	25060.5	24	1112.2	850.3	261.9	76.5	4.114	4.410	1.635	1.456	19.4	4.1	6.0	1.0	71.4	14.2
	E1910	HC	40	31.0	1.8	18.1	15.7	1127.5	25060.5	24	1119.7	376.3	743.4	33.6	1.680	7.860	0.143	0.710	19.8	1.3	10.4	2.0	56.8	14.1
	E2136	HC	50	51.0	1.7	18.4	18.2	1887.0	25060.5	24	1724.8	872.2	862.7	50.6	1.531	5.470	0.895	0.965	16.7	1.1	7.6	3.0	86.7	16.2
	E4456	HC	40	31.0	1.5	16.7	14.3	1108.6	25060.5	24	885.0	522.0	363.0	59.0	1.001	3.740	1.061	0.502	16.4	1.2	6.8	3.0	46.5	8.7
	E-1983	HC	30	20.0	1.4	10.1	8.6	706.9	28461.0	21	518.5	398.4	120.2	76.8	1.000	9.277	0.337	0.000	17.0	0.5	15.8	13.0	28.0	10.7
EG S-02	P338	HC	40	16.0	1.2	24.0	23.3	1244.0	24430.4	22	1492.3	1098.1	394.2	73.6	1.621	1.000	1.313	1.500	13.7	1.8	3.2	0.3	19.2	4.0
	FDS-05	HC	80	80.0	2.8	23.0	20.9	5442.0	26651.3	24	4024.9	1121.6	2903.3	27.9	2.410	12.850	0.701	0.681	14.8	3.1	17.9	3.0	224.0	74.1
FDS-06	P210A	HC	80	80.0	2.8	23.0	20.9	5442.0	26651.3	24	4024.9	1121.6	2903.3	27.9	2.410	12.850	0.701	0.681	14.8	3.1	17.9	3.0	224.0	74.1
	P23JA	HC	80	80.0	2.8	22.5	20.5	5396.0	27465.0	24	4292.7	2332.9	1959.8	54.3	3.488	10.540	0.355	0.797	11.4	3.0	11.8	1.0	220.0	42.6

Obra	Estaca	Tipo	D (cm)	W (kN)	H (m)	L (m)	Lp (m)	Área (cm²)	E (MPa)	V (kN/m²)	RmK (kN)	RI (kN)	Rp (kN)	RIRu (%)	Quake (mm)	Damping (s/m)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	DmK (mm)	Nega (mm)	Ep (kNm)	BmK (kJ)		
GEF-02	E009	HC	60	39,5	2,5	16,0	15,0	2826,0	27481,4	22	2478,8	992,3	1486,6	40,0	1,270	0,801	0,372	15,2	2,5	7,2	2,5	98,8	21,5	
	E017	HC	50	39,5	2,0	15,2	14,2	1962,5	27481,4	22	2280,6	644,6	1636,0	28,3	1,910	0,110	0,370	23,2	1,8	13,4	4,0	79,0	35,1	
	E045	HC	50	39,5	1,6	17,4	16,5	1962,5	27481,4	22	1960,4	734,3	1226,1	37,5	3,237	8,820	1,184	0,788	20,7	2,6	10,2	3,0	63,2	27,6
	E051	HC	50	39,5	1,8	16,6	15,7	1962,5	27481,4	22	2114,8	1197,1	917,7	56,6	2,044	7,480	0,620	0,272	24,1	5,2	11,4	4,0	71,1	35,3
	E058	HC	50	39,5	1,4	16,6	15,5	1962,5	26439,3	22	2322,6	1487,9	824,7	64,5	1,698	7,870	0,236	0,343	23,8	6,0	34,5	4,0	55,3	34,5
	E066	HC	50	39,5	1,4	16,7	15,8	2042,0	25933,4	22	2149,0	2039,1	109,9	94,9	5,069	8,420	0,568	0,482	19,4	2,0	10,1	4,0	55,3	30,0
	E071	HC	50	39,5	1,8	17,1	16,1	1962,5	27481,4	22	2434,9	1056,7	1379,1	43,4	1,110	9,430	0,660	0,474	19,0	3,3	10,8	4,0	71,1	26,7
	E076	HC	40	39,5	0,8	16,1	15,4	1266,0	25933,4	22	1807,4	1506,6	295,7	83,6	3,155	2,850	0,353	1,399	13,8	3,1	6,0	4,0	31,6	7,9
	E077	HC	50	39,5	2,2	16,8	15,9	1962,5	27481,4	22	1361,5	869,9	491,6	63,9	2,092	3,120	0,407	0,906	24,6	3,6	16,2	8,0	86,9	38,1
	E079	HC	50	39,5	1,4	18,9	18,0	1962,5	27481,4	22	2340,5	967,0	1373,5	41,3	1,414	9,650	0,379	0,247	16,7	5,4	10,0	1,0	55,3	24,5
MDT-01	E084	HC	60	39,5	2,0	17,1	16,1	2826,0	25933,4	22	2482,1	1090,4	1391,7	43,9	2,629	7,230	1,404	0,754	19,0	3,6	7,8	2,0	79,0	31,2
	E088	HC	40	39,5	0,6	10,7	10,0	1266,0	27481,4	22	981,5	554,2	427,3	56,5	1,002	14,410	0,317	0,127	20,2	5,1	19,5	16,0	23,7	22,3
	B112A-A	HC	50	23,0	2,6	12,5	10,6	2551,8	19272,6	21	2212,6	1659,6	653,0	70,5	1,910	3,850	0,933	0,746	15,8	1,7	6,9	2,0	69,8	17,4
	E-08	ELB	40	15,0	1,4	11,8	10,7	1385,0	22025,9	24	746,1	511,9	234,2	68,6	1,000	1,610	1,361	1,394	7,0	0,5	3,9	1,5	21,0	2,9
	E-54	ELB	50	15,0	1,0	11,4	9,1	1809,0	29129,2	24	900,2	609,7	290,5	67,7	1,521	1,000	1,496	1,498	9,0	2,1	2,9	1,0	15,0	3,4
	E-82	ELB	50	30,0	0,6	11,4	9,3	1810,0	25060,5	24	897,8	486,9	210,9	69,8	3,074	3,300	1,394	1,351	5,6	0,4	5,8	0,9	18,0	4,5
	E-85	ELB	50	30,0	0,8	11,1	8,7	2600,0	24015,9	23	619,5	39,1	580,4	6,3	2,603	4,920	1,447	2,078	5,2	0,3	6,0	1,5	24,0	5,7
	E-108	ELB	70	30,0	1,0	12,4	10,0	4185,0	21108,1	23	1650,2	653,9	996,3	39,6	1,000	3,590	1,270	1,034	8,5	1,6	4,3	1,0	30,0	8,8
	P71	ELB	140	80,0	2,4	12,8	10,5	17671,0	25540,8	23	568,5	4641,7	1043,5	81,6	4,901	1,790	0,784	1,494	4,9	0,5	4,8	0,5	192,0	27,0
	P72	ELB	140	80,0	2,4	10,0	7,7	17671,0	24016,4	23	2731,3	811,7	1919,6	29,7	3,831	6,450	1,340	1,478	4,5	0,6	6,2	0,5	192,0	24,8
PEG-01	P-2A	HC	65	50,0	2,0	14,8	14,1	3026,0	25933,4	22	3388,6	2633,0	755,5	77,7	2,521	4,610	0,657	0,706	14,8	1,6	7,1	0,5	100,0	22,5
	P-19B	HC	65	50,0	2,0	14,8	14,0	3577,0	25933,4	22	2342,0	1833,2	508,8	78,3	6,347	6,770	0,700	0,118	13,4	3,0	10,8	4,0	100,0	29,6
	P-241	HC	65	50,0	2,2	14,8	14,1	3597,0	25933,4	22	2301,2	1297,9	1003,3	56,4	4,937	5,120	0,998	1,110	11,6	1,8	7,6	0,2	110,0	23,1
	B08	HC	40	16,0	1,6	14,4	12,7	1590,0	22972,2	22	1036,2	769,8	266,4	74,3	1,000	3,120	1,318	0,668	14,3	0,9	5,8	3,0	25,6	9,6
	E32	HC	40	16,0	0,8	14,3	12,7	1320,0	22972,2	22	704,8	554,6	150,3	78,7	1,200	2,540	1,420	0,290	10,8	1,2	4,8	2,0	12,8	4,6
	E33	HC	40	16,0	1,6	14,3	12,7	1382,0	22972,2	22	991,7	735,6	256,1	74,2	2,122	3,420	1,051	0,748	14,7	0,6	6,4	3,5	25,6	8,4
	E36	HC	40	16,0	0,8	14,7	13,1	1344,0	22972,2	22	1164,6	1081,8	82,8	92,9	1,633	2,270	1,418	0,478	14,6	0,4	4,2	2,0	12,8	6,1
	E41	HC	40	16,0	1,0	14,7	13,1	1267,0	22972,2	22	1050,7	977,3	73,4	93,0	1,000	1,120	0,903	0,827	16,9	3,0	5,2	2,0	16,0	7,6
	E70	HC	40	16,0	1,2	14,5	12,8	1195,0	22972,2	22	1001,3	943,3	57,9	94,2	2,552	4,090	0,523	0,430	12,2	3,0	5,8	3,0	19,2	5,1
	E73	HC	40	16,0	1,6	14,6	13,0	1462,0	22972,2	22	946,4	749,5	195,9	79,3	1,339	3,030	0,540	1,479	12,7	3,2	5,5	3,0	25,6	7,2
RGT-01	E74	HC	40	16,0	1,8	14,2	12,7	1886,0	22972,2	22	811,0	625,2	185,8	77,1	1,330	2,390	1,301	1,327	9,0	0,7	5,1	3,0	26,8	6,5
	E75	HC	40	16,0	1,7	14,3	12,7	1462,0	22972,2	22	1222,5	1168,5	54,0	95,6	2,613	6,340	0,320	1,486	12,1	1,4	6,4	4,0	27,2	8,3
	B87	HC	40	16,0	1,4	14,3	12,9	1195,0	22972,2	22	1013,0	810,4	202,6	80,0	2,223	3,270	1,344	0,216	16,5	1,1	5,5	2,0	22,4	7,9
	E-115	HC	50	31,0	1,3	16,4	15,4	2376,0	27481,4	22	2146,5	1869,0	286,5	86,6	3,711	3,870	0,959	1,478	13,5	1,4	5,5	1,0	38,8	12,8
	B03	ESR	60	20,0	2,4	8,0	7,3	3509,4	21568,8	22	1332,5	747,6	584,9	56,1	2,119	2,970	1,312	1,506	8,1	1,5	3,9	2,5	48,0	7,4
	E18	ESR	60	20,0	2,2	7,5	6,8	3476,0	21568,8	22	2180,5	1575,1	585,2	72,9	2,926	3,930	1,274	1,024	11,6	0,8	4,1	2,5	44,0	11,0
	E24	ESR	50	20,0	1,6	9,5	8,8	2494,0	21568,8	22	1554,5	1147,0	407,5	73,8	2,523	2,500	0,676	1,498	9,2	0,9	4,0	1,5	32,0	6,8
	E26	ESR	50	20,0	1,2	9,0	8,3	3509,4	21568,8	22	1931,5	1315,9	615,6	68,1	2,081	2,170	1,415	1,403	9,0	3,2	1,5	24,0	6,8	
	B81	HC	50	35,0	0,6	23,5	21,8	2437,1	22972,2	22	2244,4	1907,4	337,0	85,0	1,108	1,000	0,565	1,501	6,1	0,8	3,4	0,5	21,0	3,8
	B88	HC	50	35,0	1,4	23,5	22,2	2090,1	22972,2	22	2416,9	2133,9	283,0	88,3	2,112	2,050	0,854	1,315	12,3	1,2	6,0	0,5	48,0	11,2
STN-04	E187	HC	50	35,0	0,6	19,5	18,7	2192,8	22972,2	22	2346,8	1615,0	730,8	68,8	1,929	1,000	0,899	1,484	10,1	1,1	3,6	0,5	21,0	5,4
	F3	HC	50	36,0	1,2	12,6	11,1	1963,0	24430,4	22	1665,1	1240,3	424,8	74,5	1,000	10,840	0,591	0,527	15,9	4,2	11,4	5,0	43,2	19,5
	F4	HC	50	36,0	0,8	6,6	5,2	1963,0	22972,2	22	409,6	228,5	181,1	55,8	2,277	19,580	0,907	0,265	6,7	0,0	21,2	11,0	28,8	13,6
	Máximo		140	80,0	3,6	24,6	23,3	17671,0	33503,8	24,0	5685,2	4641,7	2903,3	95,6	9,397	19,580	1,739	2,078	30,2	6,0	34,5	16,0	224,0	74,1
TEK-01	Mínimo		30	15,0	0,6	6,6	5,2	706,0	19272,6	21,0	409,6	39,1	54,0	6,3	1,000	1,000	0,080	0,000	4,5	0,0	2,9	0,2	12,8	2,9
	Média		50	35,6	1,7	16,8	15,2	2380,4	25531,6	23,1	1880,5	1183,7	696,9	63,0	2,393	5,962	0,856	0,894	17,0	2,1	9,3	3,4	63,6	21,1
	Desvio Padrão		16	14,7	0,7	4,2	4,1	2487,4	2711,5	1,0	950,8	754,2	519,5	19,6	1,527	3,700	0,413	0,460	6,0	1,4	5,0	2,8	47,7	14,3
	Mediana		50	31,0	1,6	16,9	15,7	1962,5	25080,5	24,0	1766,0	984,8	593,4	64,7	2,087	5,340	0,816	0,817	16,9	1,8	8,2	3,0	46,5	18,6

## **APÊNDICE B**

### **INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NAS ESTACAS MODELO**

Estaca curta:  $\eta = 30$  % e  $k = 100$  kN/mm

W (kN)		6,1 kN											
		0,5			1,0			1,5			2,0		
H (m)	R <sub>u</sub> (kN)	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
SET (mm)		-1,85	-	-	-1,34	-	-	-1,10	-	-	-0,91	-	-
Golpe/m		9999,0	-	-	9999,0	-	-	9999,0	-	-	9999,0	-	-
F <sub>MX</sub> (kN)		339,9	-	-	487,8	-	-	599,9	-	-	693,9	-	-
C <sub>5X</sub> (MPa)		1,263	-	-	1,803	-	-	2,215	-	-	2,863	-	-
T <sub>5X</sub> (MPa)		0,294	-	-	0,499	-	-	0,629	-	-	0,790	-	-
ENTHRU (kJ)		0,2	-	-	0,4	-	-	0,5	-	-	0,7	-	-
Res. Ativ. (kN)		436	-	-	557	-	-	641	-	-	709	-	-
Eficiência (%)		7	-	-	7	-	-	5	-	-	6	-	-

W (kN)		12,2 kN											
		0,5			1,0			1,5			2,0		
H (m)	R <sub>u</sub> (kN)	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
SET (mm)		-0,96	-	-	-0,44	-	-	-0,07	-	-	0,27	-	-
Golpe/m		9999,0	-	-	9999,0	-	-	9999,0	-	-	3755,4	9999,0	-
F <sub>MX</sub> (kN)		493,2	-	-	700,0	-	-	888,2	-	-	991,5	998,6	-
C <sub>5X</sub> (MPa)		1,765	-	-	2,505	-	-	3,078	-	-	3,559	3,643	-
T <sub>5X</sub> (MPa)		0,279	-	-	0,376	-	-	0,405	-	-	0,467	0,718	-
ENTHRU (kJ)		0,8	-	-	1,1	-	-	1,6	-	-	2,1	1,8	-
Res. Ativ. (kN)		688	-	-	866	-	-	951	-	-	996	1487	-
Eficiência (%)		10	-	-	9	-	-	9	-	-	9	7	-

W (kN)		18,3 kN											
		0,5			1,0			1,5			2,0		
H (m)	R <sub>u</sub> (kN)	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
SET (mm)		-0,47	-	-	0,24	-1,00	-	0,85	-0,71	-	1,41	-0,48	-
Golpe/m		9999,0	-	-	4088,2	9999,0	-	1170,8	9999,0	-	710,2	9999,0	-
F <sub>MX</sub> (kN)		599,8	-	-	840,6	860,3	-	1040,9	1053,9	-	1202,0	1217,1	-
C <sub>5X</sub> (MPa)		2,122	-	-	3,005	3,238	-	3,682	3,993	-	4,252	4,634	-
T <sub>5X</sub> (MPa)		0,242	-	-	0,281	0,368	-	0,561	0,430	-	0,749	0,489	-
ENTHRU (kJ)		1,1	-	-	2,0	1,6	-	2,9	2,3	-	3,8	3,0	-
Res. Ativ. (kN)		865	-	-	993	1407	-	1000	1616	-	1000	1756	-
Eficiência (%)		12	-	-	11	9	-	11	8	-	10	8	-

W (kN)		24,4 kN											
		0,5			1,0			1,5			2,0		
H (m)	R <sub>u</sub> (kN)	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
SET (mm)		-0,10	-	-	0,91	-0,81	-	1,80	-0,48	-	2,57	-0,18	-
Golpe/m		9999,0	-	-	1096,1	9999,0	-	556,5	9999,0	-	389,2	9999,0	-
F <sub>MX</sub> (kN)		680,9	-	-	962,6	984,7	-	1178,6	1206,3	-	1360,8	1393,7	-
C <sub>5X</sub> (MPa)		2,446	-	-	3,491	3,830	-	4,287	4,717	-	4,938	5,462	-
T <sub>5X</sub> (MPa)		0,203	-	-	0,248	0,435	-	0,375	0,477	-	0,497	0,520	-
ENTHRU (kJ)		1,6	-	-	3,0	2,1	-	4,4	3,1	-	5,8	4,1	-
Res. Ativ. (kN)		947	-	-	1000	1554	-	1000	1757	-	1000	1871	-
Eficiência (%)		13	-	-	12	9	-	12	8	-	12	8	-

	3.0		
	3000	1000	2000
	-0.82	529	0.86
	9999.0	178.8	1159.8
	1819.8	1830.9	1914.6
	6.975	6.702	7.295
	0.798	0.375	0.622
	4.5	11.7	7.5
	2393	1000	2000
	6	13	8
			6

	3.0		
	3000	1000	2000
	-0.73	7.29	1.38
	9999.0	137.1	723.3
	2023.2	1979.9	2111.7
	7.494	7.319	7.921
	0.761	0.567	0.608
	5.0	15.1	9.0
	2474	1000	2000
	5	14	8
			6

	3.0		
	3000	1000	2000
	-0.64	8.89	1.99
	9999.0	112.5	501.6
	2210.0	2119.2	2296.7
	8.024	7.815	8.463
	0.785	0.559	0.578
	5.6	18.6	10.7
	2541	1000	2000
	5	15	8
			5

	3.0		
	3000	1000	2000
	-0.56	10.48	2.67
	9999.0	95.4	374.0
	2383.8	2252.7	2469.7
	8.563	8.240	8.952
	0.833	0.326	0.578
	6.3	22.3	12.6
	2602	1000	2000
	5	15	9
			5

Estaca curta:  $\eta = 30\%$  e  $k = 100 \text{ kN/mm}$

W (kN)		55,0 kN						2,5						3,0					
		0,5		1,0		1,5		2,0		2,5		3,0		3,0		3,0		3,0	
H (m)	R <sub>u</sub> (kN)	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
SET (mm)		1,76	-0,91	-	4,67	-0,30	-	6,93	0,46	-0,97	8,84	1,46	-0,73	10,52	2,46	-0,42	12,11	3,39	-0,07
Golpe/m		569,0	9999,0	-	214,2	9999,0	-	144,2	2154,7	9999,0	113,2	687,6	9999,0	95,1	408,0	9999,0	82,6	295,2	9999,0
FMX (kN)		986,3	1112,7	-	1386,6	1655,8	-	1691,1	1887,1	1993,5	1946,8	2164,1	2286,7	2170,9	2406,9	2542,4	2373,0	2625,4	2772,2
CSX (MPa)		3,649	4,168	-	5,070	5,733	-	6,168	6,866	7,234	7,086	7,810	8,273	7,881	8,630	9,174	8,588	9,380	9,989
TSX (MPa)		0,223	0,266	-	0,236	0,494	-	0,219	0,633	0,570	0,227	0,640	0,721	0,226	0,616	0,846	0,224	0,501	0,976
ENTHRU (kJ)		4,1	2,1	-	8,8	4,0	-	13,1	6,3	4,0	17,5	8,9	5,4	21,8	11,7	7,0	26,2	14,7	8,7
Res. Ativ. (kN)		1000	1498	-	1000	1833	-	1000	2000	2266	1000	2000	2478	1000	2000	2686	1000	2000	2851
Eficiência (%)		15	8	-	16	7	-	16	8	5	16	8	5	16	9	5	16	9	5

W (kN)		61,1 kN						2,5						3,0					
		0,5		1,0		1,5		2,0		2,5		3,0		3,0		3,0		3,0	
H (m)	R <sub>u</sub> (kN)	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
SET (mm)		2,20	-0,87	-	5,49	-0,19	-	8,03	0,76	-0,93	10,17	1,94	-0,63	12,06	3,08	-0,25	13,79	4,14	0,15
Golpe/m		453,5	9999,0	-	182,1	9999,0	-	124,5	1317,7	9999,0	98,3	514,9	9999,0	83,0	324,6	9999,0	72,5	241,6	6491,5
FMX (kN)		1039,1	1190,0	-	1457,1	1654,2	-	1774,1	1999,8	2115,5	2039,4	2288,5	2423,3	2271,7	2541,4	2691,6	2480,9	2768,6	2932,5
CSX (MPa)		3,873	4,422	-	5,263	6,063	-	6,400	7,252	7,651	7,347	8,281	8,747	8,162	9,111	9,702	8,883	9,827	10,571
TSX (MPa)		0,215	0,279	-	0,235	0,490	-	0,238	0,614	0,580	0,240	0,632	0,743	0,249	0,619	0,862	0,249	0,603	0,983
ENTHRU (kJ)		4,7	2,2	-	10,0	4,3	-	15,2	7,0	4,3	20,3	10,1	5,9	25,2	13,5	7,7	30,2	17,0	9,7
Res. Ativ. (kN)		1000	1531	-	1000	1870	-	1000	2000	2299	1000	2000	2553	1000	2000	2774	1000	2000	2942
Eficiência (%)		16	7	-	16	7	-	17	8	5	17	8	5	16	9	5	16	9	5

Estaca curta:  $\eta = 30 \%$   $e_k = 1200 \text{ kN/mm}$

W (kN)		0,5				1,0				1,5				2,0				2,5				3,0			
		1000	2000	3000		1000	2000	3000		1000	2000	3000		1000	2000	3000		1000	2000	3000		1000	2000	3000	
SET (mm)	H (m)	-1,46	-	-	-	-1,06	-	-	-	-0,76	-	-	-	-0,52	-	-	-	-0,31	-	-	-	-0,13	-	-	-
Golpe/m	R <sub>u</sub> (kN)	9999,0	-	-	-	9999,0	-	-	-	9999,0	-	-	-	9999,0	-	-	-	9999,0	-	-	-	9999,0	-	-	-
F <sub>MX</sub> (kN)		795,9	-	-	-	1243,8	-	-	-	1605,4	-	-	-	1916,9	-	-	-	2189,1	-	-	-	2429,4	-	-	-
CSX (MPa)		2,842	-	-	-	4,406	-	-	-	6,781	-	-	-	9,328	-	-	-	12,356	-	-	-	15,889	-	-	-
TSX (MPa)		2,109	-	-	-	3,273	-	-	-	4,187	-	-	-	4,920	-	-	-	5,552	-	-	-	6,070	-	-	-
ENTHRU (kJ)		0,4	-	-	-	0,9	-	-	-	1,3	-	-	-	1,8	-	-	-	2,3	-	-	-	2,8	-	-	-
Res. Ativ. (kN)		482	-	-	-	617	-	-	-	713	-	-	-	798	-	-	-	870	-	-	-	925	-	-	-
Eficiência (%)		13	-	-	-	15	-	-	-	14	-	-	-	15	-	-	-	15	-	-	-	15	-	-	-

W (kN)		0,5				1,0				1,5				2,0				2,5				3,0			
		1000	2000	3000		1000	2000	3000		1000	2000	3000		1000	2000	3000		1000	2000	3000		1000	2000	3000	
SET (mm)	H (m)	-0,71	-	-	-	-0,08	-	-	-	0,37	-0,34	-	-	0,74	-0,07	-	-	1,08	0,15	-0,38	-	1,38	0,35	-0,23	-
Golpe/m	R <sub>u</sub> (kN)	9999,0	-	-	-	9999,0	-	-	-	2699,5	9999,0	-	-	1343,0	9999,0	-	-	929,6	6600,3	9999,0	-	725,9	2844,2	9999,0	-
F <sub>MX</sub> (kN)		1163,7	-	-	-	1785,1	-	-	-	2238,3	2243,0	-	-	2625,2	2624,5	-	-	2961,6	2960,0	2967,7	-	3259,3	3260,8	3257,4	-
CSX (MPa)		4,176	-	-	-	6,357	-	-	-	8,024	8,085	-	-	9,328	9,441	-	-	10,537	10,599	10,735	-	11,612	11,689	11,830	-
TSX (MPa)		2,655	-	-	-	4,073	-	-	-	5,033	3,840	-	-	5,834	4,392	-	-	6,498	4,789	3,781	-	7,033	5,170	4,037	-
ENTHRU (kJ)		1,1	-	-	-	2,3	-	-	-	3,5	3,4	-	-	4,6	4,5	-	-	5,7	5,6	5,6	-	6,8	6,8	6,7	-
Res. Ativ. (kN)		752	-	-	-	948	-	-	-	1000	1684	-	-	1000	1844	-	-	1000	1947	2576	-	1000	2000	2742	-
Eficiência (%)		18	-	-	-	19	-	-	-	19	19	-	-	19	18	-	-	19	18	18	-	19	19	18	-

W (kN)		0,5				1,0				1,5				2,0				2,5				3,0			
		1000	2000	3000		1000	2000	3000		1000	2000	3000		1000	2000	3000		1000	2000	3000		1000	2000	3000	
SET (mm)	H (m)	-0,14	-	-	-	0,69	-0,20	-	-	1,33	0,21	-0,39	-	1,88	0,55	-0,14	-	2,49	0,87	0,07	-	3,06	1,17	0,26	-
Golpe/m	R <sub>u</sub> (kN)	9999,0	-	-	-	1450,4	9999,0	-	-	754,2	4816,6	9999,0	-	532,5	1814,8	9999,0	-	401,4	1148,8	9999,0	-	327,2	856,0	3840,9	-
F <sub>MX</sub> (kN)		1418,3	-	-	-	2117,6	2124,4	-	-	2641,9	2643,5	2649,8	-	3067,5	3077,3	3078,0	-	3447,2	3449,8	3469,8	-	3790,3	3792,1	3803,1	-
CSX (MPa)		5,089	-	-	-	7,603	7,660	-	-	9,446	9,569	9,702	-	11,007	11,123	11,287	-	12,356	12,525	12,707	-	13,559	13,781	13,991	-
TSX (MPa)		2,427	-	-	-	3,883	2,523	-	-	4,874	3,106	2,026	-	5,668	3,599	2,236	-	6,310	3,950	2,444	-	6,850	4,212	2,576	-
ENTHRU (kJ)		1,9	-	-	-	3,9	3,8	-	-	5,8	5,7	5,6	-	7,6	7,5	7,4	-	9,4	9,3	9,1	-	11,2	11,1	10,9	-
Res. Ativ. (kN)		942	-	-	-	1000	1842	-	-	1000	1975	2673	-	1000	2000	2823	-	1000	2000	2908	-	1000	2000	2984	-
Eficiência (%)		21	-	-	-	21	21	-	-	21	21	20	-	21	20	20	-	21	20	20	-	20	20	20	-

W (kN)		0,5				1,0				1,5				2,0				2,5				3,0			
		1000	2000	3000		1000	2000	3000		1000	2000	3000		1000	2000	3000		1000	2000	3000		1000	2000	3000	
SET (mm)	H (m)	0,34	-0,51	-	-	1,41	0,17	-0,46	-	2,46	0,69	-0,11	-	3,38	1,17	0,19	-	4,21	1,61	0,47	-	4,97	2,02	0,75	-
Golpe/m	R <sub>u</sub> (kN)	2922,9	9999,0	-	-	707,0	5949,5	9999,0	-	406,1	1446,6	9999,0	-	295,9	852,2	5164,2	-	237,8	619,9	2106,3	-	201,3	496,2	1326,4	-
F <sub>MX</sub> (kN)		1610,6	1614,7	-	-	2363,6	2372,9	2379,6	-	2931,0	2935,3	2944,2	-	3402,2	3410,5	3420,1	-	3809,5	3826,4	3835,8	-	4185,6	4188,6	4208,2	-
CSX (MPa)		5,785	5,883	-	-	8,501	8,633	8,776	-	10,513	10,704	10,882	-	12,229	12,448	12,675	-	13,732	13,974	14,255	-	15,079	15,346	15,680	-
TSX (MPa)		1,872	1,054	-	-	3,213	1,396	0,951	-	4,085	1,806	0,875	-	4,765	2,078	0,844	-	5,325	2,395	0,925	-	5,793	2,640	0,987	-
ENTHRU (kJ)		2,7	2,7	-	-	5,5	5,4	5,2	-	8,2	8,0	7,8	-	10,8	10,5	10,3	-	13,4	13,1	12,8	-	15,9	15,6	15,3	-
Res. Ativ. (kN)		1000	1680	-	-	1000	1965	2654	-	1000	2000	2837	-	1000	2000	2957	-	1000	2000	3000	-	1000	2000	3000	-
Eficiência (%)		23	22	-	-	23	22	21	-	22	22	21	-	22	22	21	-	22	21	21	-	22	21	21	-

Estaca curta:  $\eta = 30$  % e  $k = 1200$  kN/mm

W (kN)		30,5 kN																	
		0,5			1,0			1,5			2,0			2,5			3,0		
H (m)	Ru (kN)	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
SET (mm)		0,80	-0,28	-	2,37	0,51	-0,27	3,87	1,20	0,15	4,82	1,81	0,54	5,86	2,36	0,93	6,81	2,87	1,29
Golpe/m		1246,0	9099,0	-	422,2	1950,4	9099,0	272,3	832,1	6636,8	207,3	551,1	1837,1	170,6	423,0	1076,9	146,9	348,7	772,9
Fm (kN)		1760,4	1767,8	-	2557,8	2571,1	2581,0	3163,5	3171,5	3186,7	3665,7	3680,8	3694,8	4104,5	4126,3	4142,6	4506,5	4628,1	4646,9
CSX (MPa)		6,337	6,469	-	9,224	9,405	9,584	11,389	11,628	11,887	13,224	13,521	13,821	14,841	15,185	15,525	16,296	16,691	17,094
TSX (MPa)		1,206	0,751	-	2,237	0,837	0,818	2,953	0,849	0,871	3,459	0,896	0,937	3,940	0,938	0,978	4,341	0,973	1,024
ENTHRU (kJ)		3,7	3,6	-	7,3	7,0	6,7	10,8	10,4	10,0	14,2	13,7	13,3	17,6	17,0	16,5	20,9	20,3	19,8
Res. Ativ. (kN)		1000	1842	-	1000	2000	2787	1000	2000	2940	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
Eficiência (%)		24	24	-	24	23	22	24	23	22	23	22	22	23	22	22	23	22	22

W (kN)		36,6 kN																	
		0,5			1,0			1,5			2,0			2,5			3,0		
H (m)	Ru (kN)	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
SET (mm)		1,35	-0,08	-	3,26	0,88	-0,09	4,81	1,73	0,42	6,18	2,47	0,93	7,41	3,13	1,41	8,52	3,73	1,86
Golpe/m		739,7	9999,0	-	307,1	1134,0	9999,0	208,1	578,7	2362,0	181,9	405,2	1073,3	135,0	319,7	707,6	117,4	268,0	537,8
Fm (kN)		1881,2	1893,0	-	2718,7	2736,4	2749,1	3354,6	3369,9	3391,6	3883,4	3906,0	3929,0	4349,4	4376,9	4401,5	4772,6	4802,6	4831,3
CSX (MPa)		6,789	6,937	-	9,822	10,050	10,286	12,110	12,417	12,729	14,054	14,425	14,817	15,766	16,206	16,621	17,290	17,768	18,248
TSX (MPa)		0,603	0,587	-	1,239	0,645	0,715	1,716	0,611	0,803	2,123	0,595	0,832	2,631	0,603	0,890	3,225	0,615	0,943
ENTHRU (kJ)		4,7	4,5	-	9,1	8,8	8,3	13,4	13,0	12,4	17,7	17,2	16,4	21,9	21,3	20,4	26,0	25,4	24,4
Res. Ativ. (kN)		1000	1899	-	1000	2000	2842	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
Eficiência (%)		26	25	-	25	24	23	24	24	23	24	23	22	24	23	22	24	23	22

W (kN) H (m)		42,7 kN																	
		0,5			1,0			1,5			2,0			2,5			3,0		
Ru (kN)	SET (mm)	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
		1,92	0,11	-0,60	4,06	1,27	0,09	5,85	2,28	0,73	7,42	3,15	1,35	8,82	3,92	1,92	10,09	4,62	2,46
	Golpe/m	520,0	9075,8	9999,0	246,3	785,6	9999,0	171,1	439,0	1373,3	134,8	317,8	741,2	113,4	265,1	520,7	99,1	216,4	408,1
	Fm (kN)	1885,4	2001,3	2018,8	2858,0	2878,9	2900,9	3518,9	3543,2	3573,2	4072,1	4104,7	4140,5	4662,4	4699,0	4740,5	5004,4	5046,7	5093,4
	CSX (MPa)	7,177	7,356	7,546	10,339	10,618	10,906	12,741	13,121	13,507	14,781	15,228	15,662	15,540	17,039	14,519	18,110	18,663	19,182
	TSX (MPa)	0,510	0,526	0,686	0,383	0,560	0,686	0,653	0,529	0,730	1,222	0,510	0,795	1,814	0,550	0,839	2,337	0,641	0,870
	ENTHRU (kJ)	5,6	5,4	5,1	10,9	10,6	10,0	16,1	15,7	14,9	21,2	20,7	19,8	26,3	25,7	24,6	31,3	30,6	29,4
	Res. Ativ. (kN)	1000	1949	2564	1000	2000	2917	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
	Eficiência (%)	26	25	24	26	25	23	25	25	23	25	24	23	25	24	23	24	24	23

W (kN) H (m)		48,9 kN																	
		0,5			1,0			1,5			2,0			2,5			3,0		
Ru (kN)	SET (mm)	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
407,3	301pe/m	2,46	0,31	-0,50	4,80	1,70	0,29	6,82	2,87	1,07	8,57	3,86	1,79	10,13	4,75	2,46	11,55	5,54	3,07
2077,5	Fm (kN)	3240,4	9999,0	208,3	586,9	3484,4	146,7	348,7	938,5	116,7	258,9	557,3	98,7	210,7	406,7	86,6	180,4	325,9	
7,517	CSX (MPa)	2097,3	2120,2	2980,1	3007,3	3039,0	3663,2	3699,5	3741,9	4242,0	4284,2	4336,1	4750,4	4800,2	4861,1	5209,8	5267,1	5337,6	
0,339	TSX (MPa)	7,732	7,962	10,797	11,135	11,487	13,307	13,733	14,164	15,389	15,890	16,368	17,208	17,751	18,272	18,855	19,437	19,983	
	ENTHRU (kJ)	0,408	0,616	0,413	0,392	0,651	0,388	0,488	0,699	0,523	0,628	0,747	1,027	0,751	0,771	1,486	0,833	0,783	
	Res. Ativ. (kN)	6,6	6,3	5,9	12,8	12,4	11,8	18,8	18,4	17,5	24,3	23,2	30,7	30,1	28,8	36,6	35,9	34,4	
	Eficiência (%)	1000	2000	2633	1000	2000	2965	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
		27	26	24	26	25	24	26	25	24	25	25	24	25	25	24	25	24	23



Estaca curta:  $\eta = 30\%$  e  $k = 1200 \text{ kN/mm}$

W <sub>0</sub> (kN)	55.0 kN																	
	0.5			1.0			1.5			2.0			2.5			3.0		
H (m)	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
P <sub>0</sub> (kN)	2.94	0.53	-0.42	5.48	2.16	0.50	7.69	3.44	1.42	9.61	4.55	2.26	11.33	5.53	3.00	12.89	6.41	3.68
SET (mm)																		
Globe/m	3.407	1877.9	9999.0	182.5	466.1	1996.2	130.0	290.4	703.6	104.0	219.8	444.4	88.3	181.0	333.5	77.8	156.1	271.7
FMX (kN)	2456.9	2182.3	2212.1	3086.3	3122.7	3165.9	3794.9	3840.8	3900.6	4391.7	4447.3	4623.2	4916.9	4983.5	5071.9	5390.7	5468.4	5667.9
CSSX (MPa)	7.811	8.067	8.335	11.201	11.803	12.001	13.781	14.267	14.728	15.921	16.451	16.964	17.803	18.382	18.942	19.505	20.126	20.746
CSSX (MPa)	0.176	0.358	0.559	0.240	0.494	0.814	0.290	0.675	0.663	0.478	0.828	0.685	0.762	0.928	0.714	1.049	0.964	0.747
ENTHRU (k/d)	7.5	7.2	6.8	14.6	14.2	13.4	21.5	21.0	20.0	28.3	27.7	26.5	35.0	34.4	33.0	41.7	41.0	39.4
Res. Atto. (kN)	1000	2000	2685	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
Moistura (%)	27	26	25	27	26	24	26	25	24	26	25	24	26	25	24	26	25	24

		61.1 kN											
		0.5		1.0		1.5		2.0		2.5		3.0	
W (kN)	H (m)	1000	3000	1000	3000	1000	3000	1000	3000	1000	3000	1000	3000
R <sub>d</sub> (kN)		3.38	0.78	6.12	2.57	0.75	1.79	10.59	5.19	2.70	12.44	6.25	3.52
SET (mm)		295.8	1284.9	183.4	388.9	1342.2	117.5	250.6	560.1	94.4	369.9	80.4	159.9
G <sub>olpe</sub> /m		2227.9	2260.3	3183.2	3229.7	3290.3	3913.1	3973.2	4056.5	4620.1	4702.5	5055.6	5154.5
F <sub>MAX</sub> (kN)		8.085	8.375	11.580	12.014	12.465	14.204	14.717	15.216	16.403	16.974	18.336	19.974
C <sub>CSX</sub> (MPa)		0.066	0.421	0.271	0.636	0.605	0.432	0.788	0.680	0.726	0.757	0.977	0.883
T <sub>TSX</sub> (MPa)		8.5	8.1	16.3	16.0	15.1	24.0	23.6	22.5	31.7	29.8	39.2	38.6
ENTHRU (kJ)		1000	2000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	3000
Res. Ativ. (kN)		28	27	27	26	25	26	26	24	26	25	24	25
Eficiência (%)		28	27	25	26	25	26	25	24	26	25	24	25



Estaca curta:  $\eta = 66\%$  e  $k = 100 \text{ kN/mm}$

W (kN)		30,5 kN																	
		0,5			1,0			1,5			2,0			2,5			3,0		
H(m)	R <sub>u</sub> (kN)	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
SET (mm)		1,81	-0,51	-	4,10	0,20	-0,93	6,01	1,07	-0,59	7,88	1,94	-0,25	9,19	2,77	0,10	10,59	3,56	0,46
Golpe/m		533,6	9999,0	-	243,8	5037,8	9999,0	166,5	935,1	9999,0	130,2	514,7	9999,0	108,8	361,2	9999,0	94,4	281,0	2160,1
FMX (kN)		1101,1	1149,8	-	1566,3	1627,3	1694,6	1905,4	1992,6	2073,0	2199,4	2299,7	2390,7	2468,2	2569,6	2669,3	2692,0	2813,4	2920,9
CSX (MPa)		4,076	4,489	-	5,714	6,239	6,511	6,971	7,582	7,903	8,032	8,716	9,083	8,972	9,730	10,119	9,825	10,643	11,057
TSX (MPa)		0,238	0,464	-	0,346	0,647	0,769	0,373	0,613	0,910	0,339	0,604	1,135	0,339	0,616	1,285	0,347	0,627	1,367
ENTHRU (kJ)		4,3	2,8	-	8,5	5,4	3,9	12,7	8,1	5,8	16,8	10,9	7,7	21,0	13,8	9,7	25,2	16,8	11,8
Res. Ativ. (kN)		1000	1691	-	1000	1973	2293	1000	2000	2577	1000	2000	2773	1000	2000	2919	1000	2000	3000
Eficiência (%)		28	18	-	28	18	13	28	18	13	28	18	13	28	18	13	28	18	13

W (kN)		36,6 kN																	
		0,5			1,0			1,5			2,0			2,5			3,0		
H (m)	Ru (kN)	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
SET (mm)		2,59	-0,50	-	5,47	0,48	-0,85	7,80	1,65	-0,46	9,81	2,78	-0,04	11,61	3,83	0,41	13,28	4,83	0,97
Golpe/m		386,0	9999,0	-	182,8	2089,0	9999,0	128,3	605,8	9999,0	102,0	360,3	9999,0	86,1	260,8	2427,1	75,3	207,2	1035,4
FMX (kN)		1192,2	1275,7	-	1883,8	1798,3	1886,0	2060,3	2196,8	2300,6	2377,5	2531,8	2648,0	2566,8	2826,1	2963,0	2909,4	3092,1	3228,0
CSX (MPa)		4,451	4,866	-	6,240	6,776	7,000	7,612	8,231	8,492	8,764	9,466	9,746	9,776	10,530	10,845	10,673	11,498	11,834
TSX (MPa)		0,252	0,463	-	0,480	0,844	0,691	0,574	0,603	0,919	0,527	0,617	1,175	0,471	0,641	1,320	0,479	0,666	1,327
ENTHRU (kJ)		5,5	3,2	-	10,9	6,4	4,4	16,4	9,8	6,6	21,8	13,5	9,0	27,2	17,3	11,5	32,7	21,2	14,1
Res. Ativ. (kN)		1000	1751	-	1000	2000	2372	1000	2000	2662	1000	2000	2863	1000	2000	3000	1000	2000	3000
Eficiência (%)		30	17	-	30	17	12	30	18	12	30	18	12	30	19	13	30	19	13

W (kN)		42,7 kN																	
		0,5			1,0			1,5			2,0			2,5			3,0		
H (m)	Ru (kN)	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
SET (mm)		3,41	-0,40	-	6,77	0,86	-0,78	9,48	2,32	-0,32	11,82	3,69	0,22	13,92	4,94	0,88	15,95	6,11	1,58
Golpe/m		293,6	9999,0	-	147,7	1169,0	9999,0	105,5	430,2	9999,0	84,6	271,1	4648,4	71,8	202,3	1142,3	62,7	163,6	634,1
FMX (kN)		1279,0	1396,3	-	1803,4	1859,4	2061,9	2205,1	2288,2	2509,2	2543,7	2748,0	2883,5	2841,5	3064,2	3212,1	3110,3	3348,0	3508,0
CSX (MPa)		4,765	5,203	-	6,669	7,237	7,484	8,125	8,783	9,090	9,341	10,074	10,427	10,397	11,205	11,600	11,340	12,226	12,648
TSX (MPa)		0,268	0,513	-	0,512	0,844	0,957	0,546	0,564	0,957	0,475	0,555	1,214	0,467	0,569	1,284	0,503	0,578	1,302
ENTHRU (kJ)		6,7	3,6	-	13,5	7,4	4,8	20,2	11,7	7,5	26,9	16,3	10,4	33,7	21,1	13,5	40,4	26,0	16,7
Res. Ativ. (kN)		1000	1796	-	1000	2000	2436	1000	2000	2739	1000	2000	2968	1000	2000	3000	1000	2000	3000
Eficiência (%)		31	17	-	32	17	11	32	18	12	31	19	12	32	20	13	32	20	13

W <sub>0</sub> (kN)		48,9 kN																	
		0,5			1,0			1,5			2,0			2,5			3,0		
H (m)	R <sub>u</sub> (kN)	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
SET (mm)		4,24	-0,30	-	8,08	1,30	-0,71	11,15	3,06	-0,13	13,85	4,85	0,57	16,35	6,10	1,42	18,68	7,44	2,27
Golpe/m		235,8	9999,0	-	123,8	769,5	9999,0	89,7	326,3	9999,0	72,2	215,0	1739,5	61,2	163,9	704,9	53,5	134,4	441,0
FMX (kN)		1363,6	1510,5	-	1918,9	2110,9	2225,6	2343,4	2566,9	2703,1	2699,6	2949,0	3102,4	3012,9	3283,5	3462,3	3294,8	3583,9	3767,5
CSX (MPa)		5,039	5,546	-	7,047	7,867	8,018	8,558	9,200	9,873	9,815	10,851	11,085	10,905	11,820	12,317	11,872	12,864	13,437
TSX (MPa)		0,265	0,519	-	0,326	0,638	0,750	0,326	0,567	1,023	0,339	0,540	1,229	0,372	0,544	1,295	0,413	0,545	1,299
ENTHRU (kJ)		8,0	4,0	-	16,1	8,6	5,4	24,2	13,9	8,5	32,3	19,5	12,0	40,5	25,3	15,7	48,6	31,2	19,6
Res. Ativ. (kN)		1000	1834	-	1000	2000	2491	1000	2000	2828	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
Eficiência (%)		33	16	-	33	18	11	33	19	12	33	20	12	33	21	13	33	21	13

Estaca curta:  $\eta = 66\%$  e  $k = 100 \text{ kN/mm}$

W (kN)		55,0 kN																	
		0,5			1,0			1,5			2,0			2,5			3,0		
H (m)	Ru (kN)	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
SET (mm)		5,08	-0,18	-	9,41	1,79	-0,64	12,87	3,84	0,11	15,93	5,84	1,00	18,71	7,28	2,02	21,28	8,80	3,01
Golpe/m		196,8	9999,0	-	106,2	567,9	9999,0	77,7	260,7	9346,3	62,8	177,3	995,5	53,4	137,3	486,3	47,0	113,7	332,8
FMX (kN)		1442,0	1616,2	-	2024,5	2248,1	2375,4	2467,2	2727,5	2879,5	2838,5	3127,8	3300,7	3164,1	3477,6	3669,9	3458,0	3792,0	4002,7
CSX (MPa)		5,270	5,946	-	7,364	8,106	8,585	8,917	9,739	10,371	10,195	11,133	11,889	11,307	12,338	13,184	12,293	13,413	14,318
TSX (MPa)		0,231	0,514	-	0,230	0,632	0,771	0,226	0,680	1,042	0,239	0,648	1,232	0,258	0,649	1,279	0,282	0,652	1,287
ENTHRU (kJ)		9,4	4,4	-	19,0	9,8	5,9	28,3	16,2	9,6	37,9	22,9	13,7	47,4	29,8	18,1	56,9	36,9	22,9
Res. Adv. (kN)		1000	1871	-	1000	2000	2646	1000	2000	2923	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
Eficiência (%)		34	16	-	35	18	11	34	20	12	34	21	12	34	22	13	34	22	14

W (kN)		61,1 kN																	
		0,5			1,0			1,5			2,0			2,5			3,0		
H (m)	Ru (kN)	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
SET (mm)	-	5,95	-0,05	-	10,82	2,33	-0,51	14,63	4,64	0,36	17,99	6,87	1,49	21,02	8,51	2,66	23,82	10,21	3,79
Golpe/m	-	168,0	9999,0	-	92,4	429,0	9999,0	68,4	215,5	2782,6	55,6	149,9	672,8	47,6	117,5	376,0	42,0	98,0	264,2
FMX (kN)	-	1514,9	1414,4	-	2119,9	2376,2	2518,4	2578,5	2874,7	3044,9	2963,1	3290,0	3486,5	3300,4	3653,8	3873,8	3605,0	3981,3	4221,6
CSX (MPa)	-	5,471	6,286	-	7,630	8,578	9,073	9,214	10,210	10,970	10,516	11,874	12,551	11,675	12,935	13,921	12,752	14,083	15,059
TSX (MPa)	-	0,237	0,503	-	0,244	0,629	0,786	0,242	0,693	1,053	0,216	0,558	1,215	0,227	0,556	1,261	0,234	0,556	1,276
ENTHRU (kJ)	-	10,9	4,8	-	21,9	11,2	6,5	32,7	18,7	10,8	43,6	26,6	15,5	54,6	34,7	20,8	65,5	43,0	26,5
Res. Adv. (kN)	-	1000	1907	-	1000	2000	2635	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
Eficiência (%)	-	36	16	-	36	18	11	36	20	12	36	22	13	36	23	14	36	23	14

Estaca curta:  $\eta = 66\%$  e  $k = 1200 \text{ kN/m}$

6,1 kN		0,5			1,0			1,5			2,0			2,5			3,0		
W (kN)	H (m)	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
	Ru (kN)																		
	SET (mm)	-1,00	-	-	-0,45	-	-	-0,05	-	-	0,26	-0,32	-	0,54	-0,11	-	0,78	0,07	-
	Golpe/m	9999,0	-	-	9999,0	-	-	9999,0	-	-	3803,1	9999,0	-	1850,7	9999,0	-	1274,6	9999,0	-
	FMX (kN)	1310,3	-	-	2009,9	-	-	2535,5	-	-	2831,9	2941,2	-	3313,9	3320,8	-	3662,5	3669,6	-
	CSX (MPa)	4,635	-	-	7,110	-	-	8,975	-	-	10,469	10,469	-	11,722	11,751	-	12,920	12,946	-
	TSX (MPa)	3,463	-	-	5,143	-	-	6,292	-	-	7,165	5,978	-	7,978	6,514	-	8,658	6,907	-
	ENTHRU (kJ)	0,9	-	-	2,0	-	-	3,0	-	-	4,0	4,0	-	5,0	4,9	-	5,9	5,9	-
	Res. Ativ. (kN)	635	-	-	823	-	-	946	-	-	995	1627	-	1000	1758	-	1000	1856	-
	Eficiência (%)	30	-	-	33	-	-	33	-	-	33	33	-	33	32	-	32	32	-

W (kN)		0,5			1,0			1,5			2,0			2,5			3,0		
H (m)	Ru (kN)	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
SET (mm)		0,01	-	-	0,86	0,00	-	1,52	0,44	-0,16	0,82	0,11	2,71	1,17	0,33	3,31	1,49	0,55	
Golpe/m		9999,0	-	-	1165,4	9999,0	-	668,7	2250,9	9999,0	479,8	12 16,7	9519,6	309,0	857,3	2999,4	302,1	672,2	1826,1
FMX (kN)		1871,5	-	-	2740,6	2740,7	-	3395,6	3399,2	3395,0	3928,8	39 31,1	39 50,0	4414,0	4436,1	4855,2	4848,9	4868,0	4868,0
CSX (MPa)		6,670	-	-	9,745	9,844	-	12,109	12,199	12,339	14 037	14 184	14 328	15,703	15,908	16 073	17 190	17 455	17 634
TSX (MPa)		4,265	-	-	6,075	4,537	-	7,271	5,339	4,139	8,220	5,937	4,462	9,023	6,382	4,717	9,735	6,729	4,969
ENTHRU (kJ)		2,5	-	-	5,0	4,9	-	7,4	7,3	7,2	9,8	9,7	9,6	12,1	12,0	11,9	14,5	14,3	14,2
Res. Ativ. (kN)		961	-	-	1000	1880	-	1000	2000	2797	1000	2000	2922	1000	2000	3000	1000	2000	3000
Eficiência (%)		41	-	-	41	40	-	40	40	39	40	40	39	40	39	39	40	40	39

18,3 kN																		
W (kN)	0,5			1,0			1,5			2,0			2,5			3,0		
	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
H (m)																		
Ru (kN)																		
SET (mm)	0,80	-0,12	-	2,09	0,66	-0,07	3,32	1,31	0,35	4,39	1,88	0,74	5,36	2,39	1,11	6,24	2,86	1,45
Golpe/m	1242,4	9999,0	-	478,7	1515,1	9999,0	301,2	763,4	2842,9	227,6	532,1	1355,1	186,6	417,8	903,6	160,3	349,6	688,7
FMX (kN)	2214,5	2217,4	-	3196,7	3207,2	3209,5	3960,2	3963,2	3963,9	4682,1	4683,9	4694,0	5132,8	5140,6	5142,5	5625,3	5641,0	5635,2
CSX (MPa)	7,938	8,030	-	11,476	11,609	11,773	14,118	14,367	14,593	16,393	16,665	16,960	18,400	18,690	19,036	20,205	20,513	20,908
TSX (MPa)	4,082	2,639	-	5,891	3,728	2,315	7,088	4,564	2,633	8,010	4,880	2,911	8,881	5,269	3,184	9,646	5,561	3,395
ENTHRU (kJ)	4,2	4,1	-	8,2	8,1	8,0	12,1	12,0	11,8	16,0	15,8	15,5	19,8	19,6	19,3	23,7	23,3	23,0
Res. Ativ. (kN)	1000	1876	-	46	44	44	44	44	43	44	43	42	43	43	42	43	42	42
Eficiência (%)	46	46	-	46	44	44	44	44	43	44	43	42	43	43	42	43	42	42

24.4 kN		0,5			1,0			1,5			2,0			2,5			3,0		
W (kN)	H (m)	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
Ru (kN)		1,6	0,26	-0,39	3,66	1,33	0,29	5,33	2,20	0,89	6,76	2,86	1,44	8,03	3,63	1,84	9,18	4,24	2,40
SET (mm)																			
Golpe/m		625,7	3850	9999	272,9	754,6	347,1,1	187,8	463,5	1124,2	148,0	338,2	694,1	124,5	275,7	515,6	108,9	236,1	417,4
FMX (kN)		2465,9	2476,2	2483,1	3543,8	3555,0	3564,6	436,1,2	4372,0	4381,9	5050,8	5059,3	5076,2	5657,9	5668,8	5686,6	6205,4	6218,5	6237,1
CSX (MPa)		8,872	9,007	9,163	12,751	12,977	13,223	15,709	16,001	16,347	18,179	18,593	18,979	20,388	20,878	21,344	22,377	22,919	23,446
TSX (MPa)		3,381	1,46	0,947	4,979	2,189	0,874	6,021	2,742	0,998	6,929	3,065	1,056	7,728	3,349	1,121	8,438	3,607	1,134
ENTHRU (kJ)		6	5,8	5,7	11,7	11,4	11,1	17,2	16,8	16,5	22,6	22,2	21,8	28,0	27,6	27,1	33,4	32,9	32,3
Res. Ativ. (kN)		1000	1989	2698	1000	2000	2995	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
Eficiência (%)		49	48	47	48	47	45	47	46	45	46	45	44	46	45	44	48	46	44

Estaca curta:  $\eta = 65\%$  e  $k = 1200 \text{ kN/m}$

W (kN)		30,5 kN		1,0		1,5		2,0		2,5		3,0	
		1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
H (m)	R <sub>u</sub> (kN)	2,60	0,63	-0,19	5,18	2,00	0,67	7,26	3,10	1,47	9,02	4,04	2,17
SET (mm)	Golpe/m	384,4	1579,8	9999,0	193,1	499,3	1481,8	137,8	322,4	681,1	110,9	247,5	480,7
FMX (kN)		2668,4	2681,6	2691,9	3818,6	3834,9	3849,8	4694,4	4715,8	4736,2	5433,3	5453,0	5480,7
CSX (MPa)		9,622	9,811	10,000	13,784	14,096	14,410	16,977	17,397	17,831	19,825	20,159	20,647
TSX (MPa)		2,377	0,825	0,831	3,623	0,911	0,943	4,639	0,991	1,049	5,505	1,084	1,126
ENTHRU (kJ)		7,9	7,6	7,3	15,3	14,8	14,4	22,6	22,0	21,4	29,7	29,0	28,3
Res. Ativ. (kN)		1000	2000	2802	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
Eficiência (%)		52	50	48	50	49	47	49	48	46	48	47	46

W (kN)		36,6 kN		1,0		1,5		2,0		2,5		3,0	
		1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
H (m)	R <sub>u</sub> (kN)	3,53	1,03	-0,01	6,60	2,70	1,10	9,05	4,02	2,07	11,12	5,14	2,93
SET (mm)	Golpe/m	283,3	969,8	9999,0	161,5	370,8	912,6	110,5	248,0	482,2	89,9	194,6	341,7
FMX (kN)		2835,1	2851,7	2866,5	4043,5	4069,1	4092,3	4970,7	5001,8	5032,7	5750,2	5786,3	5827,0
CSX (MPa)		10,240	10,482	10,729	14,647	15,041	15,465	17,998	18,494	19,007	20,790	21,384	21,907
TSX (MPa)		1,325	0,642	0,731	2,258	0,597	0,654	3,489	0,821	0,961	4,527	0,898	1,053
ENTHRU (kJ)		9,8	9,5	9,0	19,1	18,5	17,7	28,1	27,4	26,4	37,1	36,2	35,0
Res. Ativ. (kN)		1000	2000	2878	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
Eficiência (%)		54	52	49	52	51	48	51	49	48	50	48	47

W (kN)		42,7 kN		1,0		1,5		2,0		2,5		3,0	
		1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
H (m)	R <sub>u</sub> (kN)	4,37	1,46	0,20	7,90	3,41	1,55	10,69	4,95	2,70	13,05	6,26	3,70
SET (mm)	Golpe/m	228,8	888,5	5043,6	126,6	292,9	847,2	93,5	201,8	370,1	76,6	169,7	270,2
FMX (kN)		2978,7	3000,3	3022,7	4242,0	4275,8	4313,4	5211,4	5255,2	5305,9	6027,8	6081,0	6144,2
CSX (MPa)		10,775	11,074	11,378	15,392	15,866	16,306	18,860	19,427	19,964	21,789	22,413	22,986
TSX (MPa)		0,382	0,554	0,689	1,430	0,508	0,608	2,572	0,704	0,882	3,514	1,038	0,911
ENTHRU (kJ)		11,8	11,4	10,8	22,9	22,3	21,4	33,8	33,0	31,8	44,5	43,6	42,0
Res. Ativ. (kN)		1000	2000	2959	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
Eficiência (%)		55	53	51	54	52	50	53	52	50	52	51	49

W (kN)		48,9 kN		1,0		1,5		2,0		2,5		3,0	
		1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
H (m)	R <sub>u</sub> (kN)	5,16	1,91	0,41	9,11	4,17	2,02	12,22	5,92	3,36	14,86	7,40	4,50
SET (mm)	Golpe/m	193,9	622,8	2421,0	109,8	239,9	494,5	81,8	188,9	297,9	67,3	136,1	222,1
FMX (kN)		3104,9	3133,5	3166,8	4418,0	4462,7	4517,5	5425,1	5485,7	5560,8	6272,4	6348,5	6441,0
CSX (MPa)		11,251	11,612	11,981	16,013	16,531	17,021	19,626	20,226	20,792	22,865	23,340	23,988
TSX (MPa)		0,421	0,391	0,653	0,894	0,673	0,768	1,699	0,857	0,785	2,527	1,002	0,803
ENTHRU (kJ)		13,8	13,4	12,7	26,8	26,2	25,1	39,5	38,8	37,2	52,0	51,2	49,3
Res. Ativ. (kN)		1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
Eficiência (%)		56	55	52	55	54	51	54	53	51	53	52	50

Estaca curta:  $\eta = 65\%$  e  $k = 1200 \text{ kN/mm}$

W (kN)	55,0 kN											
	0,5			1,0			1,5			2,0		
H (m)	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
R <sub>u</sub> (kN)	5,87	2,38	0,66	10,21	4,89	2,51	13,62	6,82	4,00	16,51	8,46	5,28
SET (mm)	170,2	420,3	1517,7	98,0	204,6	398,8	73,4	146,6	249,9	60,6	118,3	189,6
Go/pem	3214,3	3253,3	3299,0	4673,5	4632,8	4712,8	5612,8	5695,3	5799,2	6486,0	6590,1	6711,9
FMX (kN)	11,676	12,099	12,510	16,573	17,119	17,645	20,296	20,949	21,602	23,439	24,955	26,207
CSX (MPa)	0,252	0,525	0,823	0,579	0,869	0,887	1,214	0,982	0,763	1,900	0,887	0,809
ENTHRU (kJ)	15,7	15,4	14,5	30,5	30,0	28,7	46,0	44,3	42,6	59,4	58,5	56,4
Res. Ativ. (kN)	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
Eficiência (%)	57	56	53	55	55	52	55	54	52	54	53	51

W (kN)	61,1 kN											
	0,5			1,0			1,5			2,0		
H (m)	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
R <sub>u</sub> (kN)	6,55	2,83	0,93	11,23	5,56	2,99	14,92	7,66	4,62	18,04	9,43	6,02
SET (mm)	152,8	353,6	1078,8	89,0	179,9	334,8	67,0	130,5	216,3	55,0	106,0	166,2
Go/pem	3316,1	3364,7	3429,1	4713,2	4792,0	4898,5	5783,6	5889,8	6024,2	6687,5	6813,3	6970,5
FMX (kN)	12,068	12,508	12,961	17,073	17,665	18,266	20,904	21,634	22,389	24,137	24,995	25,854
CSX (MPa)	0,298	0,668	0,821	0,809	0,882	0,739	1,346	0,809	0,808	1,947	0,846	0,886
ENTHRU (kJ)	17,6	17,2	16,3	34,2	33,6	32,2	50,4	49,8	47,8	66,5	65,9	63,3
Res. Ativ. (kN)	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
Eficiência (%)	58	56	53	56	55	53	55	54	52	54	54	51





Estaca média:  $\eta = 30\%$  e  $k = 80$  kN/mm

w (kN)		35,3 kN												3,0		
		0,5			1,0			1,5			2,0					2,5
H (m)	Ru (kN)	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800
SET (mm)		1,31	-1,61	-	3,59	-1,01	-	5,46	-0,21	-	7,06	0,58	-1,58	8,49	1,30	-1,36
Golpe/m		762,0	9999,0	-	278,3	9999,0	-	183,1	9999,0	-	141,6	172,47	9999,0	117,8	771,6	9999,0
Fmk (kN)		735,0	770,2	-	1033,0	1083,0	-	1260,2	1320,5	-	1461,0	1519,1	1677,7	1618,8	1693,2	1757,1
CSX (MPa)		3,744	4,115	-	5,262	5,729	-	6,420	6,940	-	7,392	7,946	8,495	8,246	8,824	9,439
TSX (MPa)		0,381	0,287	-	0,641	0,335	-	0,989	0,532	-	1,353	0,811	0,735	1,642	0,837	0,818
ENTHRU (kJ)		2,7	1,7	-	5,3	3,4	-	7,8	5,2	-	10,3	7,0	4,9	12,7	8,9	6,2
Res. Ativ (kN)		776	1272	-	800	1505	-	800	1580	-	800	1666	2080	800	1743	2208
Eficiência (%)		15	10	-	15	10	-	15	10	-	15	10	7	14	10	7

w (kN)		42,4 kN												3,0		
		0,5			1,0			1,5			2,0					2,5
H (m)	Ru (kN)	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800
SET (mm)		2,03	-1,54	-	4,89	-0,75	-	7,19	0,26	-1,72	9,13	1,20	-1,45	10,85	2,05	-1,10
Golpe/m		493,7	9999,0	-	204,4	9999,0	-	139,2	3820,7	9999,0	109,5	834,7	9999,0	92,1	489,0	9999,0
Fmk (kN)		794,8	843,7	-	1113,8	1182,5	-	1357,5	1437,2	1515,8	1562,3	1650,4	1737,2	1742,2	1837,4	1904,5
CSX (MPa)		4,049	4,569	-	5,673	6,305	-	6,915	7,636	8,106	7,859	8,753	9,293	8,875	9,732	10,329
TSX (MPa)		0,249	0,474	-	0,447	0,447	-	0,727	0,701	0,841	0,920	0,757	0,681	1,251	0,774	0,829
ENTHRU (kJ)		3,5	2,0	-	6,9	4,1	-	10,2	6,3	4,1	13,4	8,6	5,7	16,8	11,0	7,4
Res. Ativ (kN)		800	1307	-	800	1532	-	800	1632	1968	800	1733	2145	800	1800	2284
Eficiência (%)		17	9	-	16	10	-	16	10	6	16	10	7	16	10	7

w (kN)		49,5 kN												3,0		
		0,5			1,0			1,5			2,0					2,5
H (m)	Ru (kN)	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800
SET (mm)		2,78	-1,46	-	6,24	-0,48	-	8,96	0,70	-1,55	11,28	1,77	-1,27	13,31	2,87	-0,87
Golpe/m		360,2	9999,0	-	160,2	9999,0	-	111,6	1421,2	9999,0	88,7	663,6	9999,0	75,1	346,6	9999,0
Fmk (kN)		844,9	920,7	-	1181,7	1279,7	-	1439,1	1549,1	1655,0	1655,1	1774,8	1892,1	1845,2	1972,9	2099,3
CSX (MPa)		4,356	4,952	-	6,020	6,823	-	7,331	8,231	8,725	8,432	9,405	9,973	9,400	10,435	11,061
TSX (MPa)		0,208	0,460	-	0,233	0,463	-	0,402	0,812	0,885	0,523	0,780	0,739	0,675	0,854	0,947
ENTHRU (kJ)		4,4	2,3	-	8,6	4,7	-	12,8	7,4	4,7	16,8	10,3	6,5	20,8	13,3	8,5
Res. Ativ (kN)		800	1336	-	800	1552	-	800	1679	2022	800	1795	2221	800	1800	2342
Eficiência (%)		18	9	-	17	9	-	17	10	6	17	10	7	17	11	7

w (kN)		56,5 kN												3,0		
		0,5			1,0			1,5			2,0					2,5
H (m)	Ru (kN)	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800
SET (mm)		3,58	-1,37	-	7,65	-0,22	-	10,81	1,13	-1,54	13,48	2,42	-1,12	15,84	3,78	-0,62
Golpe/m		279,1	9999,0	-	130,8	9999,0	-	92,5	885,2	9999,0	74,2	412,4	9999,0	63,1	264,4	9999,0
Fmk (kN)		888,6	998,0	-	1240,9	1375,1	-	1509,5	1668,0	1784,4	1735,2	1895,2	2036,5	1933,7	2103,7	2256,6
CSX (MPa)		4,802	5,293	-	6,355	7,272	-	7,896	8,757	9,286	8,840	10,000	10,604	9,851	11,090	11,754
TSX (MPa)		0,184	0,289	-	0,194	0,467	-	0,314	0,681	0,601	0,336	0,707	0,659	0,287	0,806	0,846
ENTHRU (kJ)		5,2	2,5	-	10,4	5,3	-	15,4	8,5	5,2	20,3	12,1	7,3	25,0	15,7	9,6
Res. Ativ (kN)		800	1359	-	800	1580	-	800	1725	2079	800	1800	2267	800	1800	2390
Eficiência (%)		18	9	-	18	9	-	18	10	6	18	11	7	18	11	7

Estaca média:  $\eta = 30\%$  e  $k = 80 \text{ kN/mm}$

W (kN)		63,6 kN				2,0				2,5				3,0			
		0,5		1,0		1,5		2,0		2,5		3,0		3,0		3,0	
H (m)	F <sub>u</sub> (kN)	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	2800
SET (mm)		4,48	-1,29	-	9,11	0,06	-	12,87	1,91	-1,44	15,65	3,20	-0,95	18,34	4,77	-0,30	20,95
Golpe/m		222,9	9999,0	-	109,7	9999,0	-	63,9	312,4	9999,0	64,5	209,8	9999,0	47,7	160,8	2467,6	0,41
FMK (kN)		929,6	1074,1	-	1295,5	1469,4	-	1574,2	1765,6	1906,9	1808,5	2013,9	2173,2	2014,6	2232,0	2405,5	2614,1
CSX (MPa)		4,847	5,633	-	6,686	7,703	-	8,092	9,249	9,848	9,275	10,539	11,227	10,316	11,669	12,427	13,501
TSX (MPa)		0,171	0,237	-	0,246	0,469	-	0,346	0,496	0,443	0,249	0,580	0,591	0,114	0,685	0,763	0,828
ENTHRU (kJ)		6,2	2,7	-	12,3	5,9	-	18,1	9,9	5,7	23,8	14,0	8,1	29,4	18,2	10,9	35,0
Res. Ativ. (kN)		800	1384	-	800	1609	-	800	1777	2125	800	1800	2319	800	1800	2444	2563
Eficiência (%)		19	8	-	19	9	-	19	10	6	19	11	6	18	11	7	7

W (kN)		70,7 kN				2,0				2,5				3,0			
		0,5		1,0		1,5		2,0		2,5		3,0		3,0		3,0	
H (m)	F <sub>u</sub> (kN)	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	2800
SET (mm)		5,38	-1,21	-	10,53	0,35	-1,82	14,45	2,16	-1,33	17,73	4,05	-0,72	20,71	5,80	0,10	23,60
Golpe/m		185,9	9999,0	-	94,9	2833,2	9999,0	69,2	467,6	9999,0	56,4	247,1	9999,0	48,3	172,3	9799,4	42,4
FMK (kN)		967,9	1146,4	-	1346,3	1569,2	1683,0	1634,0	1867,8	2020,8	1876,0	2126,0	2300,3	2089,0	2362,7	2543,8	2281,4
CSX (MPa)		5,063	5964,000	-	6,974	8,113	8,640	8,437	9,709	10,388	9,867	11,035	11,816	10,748	12,194	13,056	11,724
TSX (MPa)		0,176	0,204	-	0,266	0,384	0,419	0,266	0,388	0,419	0,130	0,500	0,513	0,180	0,607	0,681	0,200
ENTHRU (kJ)		7,1	3,0	-	14,2	6,7	3,8	20,9	11,4	6,3	27,4	16,2	9,3	33,9	21,0	12,5	40,3
Res. Ativ. (kN)		800	1413	-	800	1642	1870	800	1800	2167	800	1800	2373	800	1800	2511	2643
Eficiência (%)		20	8	-	20	9	5	20	11	6	19	11	7	19	12	7	8



Estaca média:  $\eta = 30\%$  e  $k = 1200$  kN/mm

W (kN)		35,3 kN											
		0,5			1,0			1,5			2,0		
H (m)	Ru (kN)	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800
SET (mm)		2,09	-0,08	-	4,37	1,22	-0,27	6,66	2,26	0,43	8,68	3,20	1,05
Golpe (m)		477,4	9999,0	-	229,1	819,5	9999,0	150,1	443,3	2318,2	115,2	312,6	955,7
Fmk (kN)		1549,3	1560,4	-	2244,7	2255,2	2270,3	2767,7	2781,8	2796,9	3203,7	3220,0	3240,7
CSX (MPa)		8,021	8,196	-	11,616	11,861	12,146	14,320	14,665	15,034	16,608	16,994	17,416
TSX (MPa)		3,425	1,300	-	5,201	2,073	0,854	6,432	2,897	0,687	7,438	3,121	0,968
ENTHRU (kJ)		4,8	4,8	-	9,5	9,2	8,9	14,1	13,7	13,3	18,6	18,1	17,7
Res. Ativ. (kN)		800	1595	-	800	1735	2449	800	1800	2567	800	1800	2762
Eficiência (%)		27	26	-	27	26	25	27	26	25	26	26	25

W (kN)		42,4 kN											
		0,5			1,0			1,5			2,0		
H (m)	Ru (kN)	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800
SET (mm)		2,83	0,21	-0,89	5,99	1,74	-0,01	8,76	3,02	0,83	11,16	4,16	1,55
Golpe (m)		352,8	4684,9	9999,0	167,0	573,4	9999,0	114,2	331,3	1203,4	89,6	240,1	843,5
Fmk (kN)		1636,5	1650,9	1667,3	2357,6	2373,2	2393,8	2899,9	2922,8	2948,4	3358,5	3382,3	3414,8
CSX (MPa)		8,481	8,700	8,939	12,216	12,535	12,904	15,046	15,441	15,869	17,394	17,863	18,325
TSX (MPa)		2,808	0,718	0,998	4,396	0,948	0,689	5,538	1,374	0,788	6,419	1,729	0,624
ENTHRU (kJ)		5,9	5,6	5,3	11,7	11,2	10,8	17,3	16,7	16,2	22,9	22,2	21,7
Res. Ativ. (kN)		800	1626	2337	800	1792	2493	800	1800	2634	800	1800	2755
Eficiência (%)		28	26	25	28	26	25	27	26	25	27	26	25

W (kN)		49,5 kN											
		0,5			1,0			1,5			2,0		
H (m)	Ru (kN)	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800
SET (mm)		3,65	0,51	-0,80	7,53	2,28	0,27	10,73	3,80	1,24	13,47	5,15	2,06
Golpe (m)		273,8	1951,2	9999,0	132,8	438,9	3729,6	93,2	262,9	808,9	74,2	194,2	484,4
Fmk (kN)		1708,9	1727,1	1750,1	2451,2	2474,1	2505,5	3013,8	3044,1	3083,9	3488,1	3523,2	3571,8
CSX (MPa)		8,862	9,133	9,438	12,713	13,111	13,517	15,623	16,082	16,540	18,047	18,564	19,077
TSX (MPa)		2,151	0,766	0,712	3,552	0,403	1,005	4,521	0,506	0,941	5,302	0,565	0,886
ENTHRU (kJ)		7,1	6,8	6,3	13,9	13,2	12,7	20,6	19,8	19,2	27,3	26,3	25,6
Res. Ativ. (kN)		800	1659	2359	800	1800	2539	800	1800	2702	800	1800	2800
Eficiência (%)		29	27	25	28	27	26	28	27	26	28	27	26

W (kN)		56,5 kN											
		0,5			1,0			1,5			2,0		
H (m)	Ru (kN)	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800
SET (mm)		4,61	0,81	-0,72	8,95	2,84	0,55	12,52	4,59	1,63	15,59	6,13	2,62
Golpe (m)		217,0	1235,2	9999,0	111,7	362,7	1821,2	79,9	217,7	812,9	64,2	163,0	382,3
Fmk (kN)		1768,6	1792,9	1825,3	2529,5	2562,1	2609,1	3110,3	3151,2	3210,8	3697,1	3746,8	3718,1
CSX (MPa)		9,181	9,511	9,886	13,137	13,574	14,021	16,107	16,615	17,140	18,615	19,178	19,792
TSX (MPa)		1,501	0,799	0,609	2,702	0,536	0,997	3,487	0,550	0,790	4,183	0,662	0,951
ENTHRU (kJ)		8,3	7,7	7,2	16,2	15,4	14,7	24,0	23,0	22,1	31,7	30,6	29,5
Res. Ativ. (kN)		800	1691	2373	800	1800	2586	800	1800	2768	800	1800	2800
Eficiência (%)		29	27	25	29	27	26	28	27	26	28	27	26

Estraca média:  $\eta = 30\%$  e  $k = 1200 \text{ kN/mm}$

		63,6 kN											
		0,5			1,0			1,5			2,0		
W (kN)	H (m)	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800
SET (mm)	Ru (kN)	5,50	1,11	-0,63	10,27	3,42	0,84	14,19	5,41	2,04	17,56	7,15	3,21
Golpe/m		181,8	899,7	9999,0	97,4	292,2	1190,2	70,5	184,7	489,7	57,0	139,9	311,5
Fmk (kN)		1822,0	1853,3	1901,4	2601,7	2644,2	2713,7	3195,1	3250,6	3334,4	3693,8	3760,5	3856,2
CSX (MPa)		9,474	9,858	10,286	13,402	13,977	14,504	16,549	17,106	17,757	19,115	19,766	20,498
TSX (MPa)		0,879	0,833	0,524	1,854	0,532	0,580	2,507	0,483	0,594	3,415	0,416	0,565
ENTHRU (kJ)		9,5	8,8	8,2	18,4	17,7	16,6	27,3	26,4	25,1	36,1	35,1	33,5
Res. Ativ. (kN)		800	1723	2388	800	1800	2635	800	1800	2800	800	1800	2800
Eficiência (%)		30	28	26	29	28	26	29	28	26	28	27	26

		70,7 kN											
		0,5			1,0			1,5			2,0		
W (kN)	H (m)	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800
SET (mm)	Ru (kN)	6,31	4,41	-0,51	11,48	4,03	1,13	15,72	6,26	2,50	19,38	8,18	3,83
Golpe/m		158,4	707,1	9999,0	87,1	248,2	881,4	63,6	159,9	400,7	51,6	122,2	281,1
Fmk (kN)		1869,6	1909,4	1985,6	2664,9	2721,2	2816,3	3271,2	3342,3	3452,5	3782,3	3864,6	3988,0
CSX (MPa)		9,725	10,154	10,643	13,820	14,355	15,013	16,936	17,577	18,346	19,552	20,293	21,148
TSX (MPa)		0,477	0,526	0,476	1,468	0,473	0,553	1,844	0,374	0,551	2,879	0,359	0,513
ENTHRU (kJ)		10,6	10,0	9,1	20,7	20,0	18,6	30,6	29,9	28,1	40,5	39,6	37,5
Res. Ativ. (kN)		800	1756	2408	800	1800	2685	800	1800	2800	800	1800	2800
Eficiência (%)		30	28	26	29	28	26	29	28	26	29	28	27

Estaca média:  $\eta = 65\%$  e  $k = 80$  kN/mm

7,1 kN																		
W (kN)	0,5			1,0			1,5			2,0			2,5			3,0		
H (m)	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800
Ru (kN)	-	-	-	-0,35	-	-	0,19	-1,16	-	0,55	-0,92	-	1,07	-0,72	-	1,46	-0,53	-
SET (mm)	-1,03	-	-	9999,0	-	-	5397,9	9999,0	-	1539,5	9999,0	-	930,4	9999,0	-	882,6	9999,0	-
Golpe/m	9999,0	-	-	9999,0	-	-	857,8	862,0	-	990,4	995,9	-	1107,4	1113,6	-	1213,5	1220,2	-
FmX (kN)	493,6	-	-	700,2	-	-	4,509	4,618	-	5,208	5,338	-	5,824	5,973	-	6,383	6,549	-
CSX (MPa)	2,601	-	-	3,682	-	-	2,758	2,341	-	3,117	2,518	-	3,417	2,600	-	3,699	2,747	-
TSX (MPa)	1,591	-	-	2,264	-	-	1,7	1,6	-	2,3	2,1	-	2,8	2,6	-	3,4	3,1	-
ENTHRU (kJ)	0,6	-	-	1,2	-	-	1,7	1,6	-	2,3	2,1	-	2,8	2,6	-	3,4	3,1	-
Res. Atv. (kN)	587	-	-	703	-	-	722	1309	-	744	1457	-	764	1526	-	783	1178	-
Eficiência (%)	17	-	-	17	-	-	16	15	-	16	15	-	16	15	-	16	15	-

14,1 kN																		
W (kN)	0,5			1,0			1,5			2,0			2,5			3,0		
H (m)	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800
Ru (kN)	0,05	-	-	1,37	-0,97	-	2,44	-0,54	-	3,40	-0,05	-	4,28	0,41	-1,19	5,09	0,84	-1,05
SET (mm)	9999,0	-	-	729,7	9999,0	-	410,0	9999,0	-	293,9	9999,0	-	233,6	2446,9	9999,0	196,3	1189,1	9999,0
Golpe/m	694,9	-	-	981,4	996,2	-	1201,5	1220,1	-	1386,8	1408,7	-	1549,9	1574,6	1597,9	1697,2	1724,3	1780,0
Fm (kN)	3,664	-	-	5,172	5,360	-	6,303	6,535	-	7,259	7,511	-	8,099	8,371	8,586	9,147	9,372	9,732
CSX (MPa)	0,605	-	-	0,806	0,468	-	0,973	0,492	-	1,242	0,627	-	1,616	0,760	1,032	1,933	0,790	1,025
TSX (MPa)	1,5	-	-	2,9	2,4	-	4,3	3,6	-	5,7	4,7	-	7,2	5,9	5,0	8,6	7,1	6,0
ENTHRU (kJ)	715	-	-	778	1530	-	800	1555	-	800	1598	-	800	1648	2319	800	1694	2368
Res. Ativ. (kN)	21	-	-	21	17	-	20	17	-	20	17	-	20	17	14	20	17	14
Eficiência (%)	21	-	-	21	17	-	20	17	-	20	17	-	20	17	14	20	17	14

21,2 kN																					
W (kN)	0,5						1,0			1,5			2,0			2,5			3,0		
H (m)	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800
Ru (kN)	1,29	-1,29	-	3,42	-0,60	-	5,21	0,27	-1,40	6,77	1,06	-1,20	8,17	1,77	-0,89	9,46	2,46	-0,50	9,46	2,46	-0,50
SET (mm)	772,3	9999,0	-	292,7	9999,0	-	191,9	3712,8	9999,0	147,7	343,9	9999,0	122,4	566,3	9999,0	105,8	407,6	9999,0	105,8	407,6	9999,0
Golpe/m	847,8	870,6	-	1195,3	1228,7	-	1460,9	1501,7	1538,2	1684,4	1730,9	1772,6	1881,0	1932,5	1978,3	2058,7	2114,3	2183,7	2058,7	2114,3	2183,7
Fm (kN)	4,467	4,651	-	6,243	6,513	-	7,611	7,823	8,157	8,762	9,110	9,371	9,774	10,152	10,437	10,889	11,093	11,400	10,889	11,093	11,400
CSX (MPa)	0,572	0,708	-	0,781	0,935	-	1,043	1,211	1,738	1,344	1,235	1,743	1,685	1,146	1,743	2,015	1,343	1,929	2,015	1,343	1,929
TSX (MPa)	2,8	2,1	-	5,3	4,0	-	7,9	6,1	4,7	10,5	8,2	6,4	13,1	10,3	8,1	15,8	12,5	9,8	15,8	12,5	9,8
ENTHRU (kJ)	2,8	2,1	-	5,3	4,0	-	7,9	6,1	4,7	10,5	8,2	6,4	13,1	10,3	8,1	15,8	12,5	9,8	15,8	12,5	9,8
Res. Ativ. (kN)	775	1467	-	800	1574	-	800	1633	2237	800	1718	2343	800	1784	2413	800	1800	2430	800	1800	2430
Eficiência (%)	26	20	-	25	19	-	25	19	15	25	19	15	25	19	15	25	20	15	25	20	15

28,3 kN																		
W (kN)	0,5			1,0			1,5			2,0			2,5			3,0		
H (m)	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800
Ru (kN)	2,60	-1,15	-	5,50	0,12	-1,58	7,90	1,30	-1,30	9,97	2,34	-0,76	11,82	3,36	-0,17	13,67	4,35	0,39
SET (mm)	384,5	9999,0	-	181,7	8430,9	9999,0	126,6	767,8	9999,0	100,3	427,8	9999,0	84,6	297,3	9999,0	73,2	229,9	2561,1
Golpe/m	973,6	1011,5	-	1369,3	1422,6	1487,4	1671,5	1735,1	1788,6	1925,9	1997,0	2057,4	2149,6	2226,9	2293,1	2351,6	2404,8	255,3
Fm (kN)	5,015	5,265	-	7,034	7,356	7,842	8,576	8,953	9,235	9,873	10,294	10,615	11,014	11,472	11,822	12,046	12,536	12,912
CSX (MPa)	0,747	0,586	-	1,372	1,022	1,099	1,905	1,090	1,093	2,310	1,089	1,402	2,637	1,296	1,578	2,914	1,589	1,769
ENTHRU (kJ)	4,2	2,9	-	8,1	5,9	4,3	12,0	8,9	6,6	16,0	12,0	9,0	20,0	15,1	11,5	23,9	18,3	14,0
Res. Atv. (kN)	800	1494	-	800	1616	2094	800	1744	2274	800	1800	2386	800	1800	2466	800	1800	2560
Eficiência (%)	30	20	-	29	21	15	28	21	16	28	21	16	28	21	16	28	22	16

Estaca média:  $\eta = 66\%$  e  $k = 80$  kN/mm

W (kN)		0,5		1,0		1,5		2,0		2,5		3,0	
H (m)		800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800
SET (mm)		3,93	-0,89	-1,53	7,55	0,83	-1,53	10,47	2,28	-0,91	13,04	3,67	-0,17
Golpe/m		254,5	9999,0	-	132,4	1208,8	9999,0	95,5	439,2	9999,0	76,7	272,3	9999,0
FMK (kN)		1074,3	1126,3	-	1509,1	1579,3	1639,9	1841,0	1923,5	1984,1	2120,1	2211,0	2290,5
CSX (MPa)		5,473	5,951	-	7,888	8,251	8,822	9,378	9,981	10,887	10,800	11,436	12,444
TSX (MPa)		0,710	0,367	-	1,469	0,823	0,701	1,963	0,910	1,126	2,295	1,129	1,416
ENTHRU (kN)		5,7	3,7	-	11,1	7,7	5,3	16,4	11,7	8,3	21,8	15,9	11,5
Res. Ativ. (kN)		800	1525	-	800	1693	2119	800	1800	2343	800	1800	2468
Eficiência (%)		32	21	-	31	22	15	31	23	16	31	23	17

W (kN)		0,5		1,0		1,5		2,0		2,5		3,0	
H (m)		800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800
SET (mm)		5,31	-0,58	-1,33	9,73	1,49	-1,33	13,21	3,34	-0,53	16,72	5,12	0,38
Golpe/m		188,5	9999,0	-	102,8	672,5	9999,0	75,7	296,3	9999,0	59,8	195,3	2639,6
FMK (kN)		1158,0	1229,0	-	1624,5	1715,2	1804,2	1980,5	2084,9	2186,1	2279,8	2395,3	2506,0
CSX (MPa)		5,999	6,547	-	8,276	9,091	9,852	10,089	11,026	11,894	11,614	12,650	13,402
TSX (MPa)		0,502	0,467	-	1,032	0,750	0,695	1,643	0,840	1,071	2,034	0,781	1,387
ENTHRU (kN)		7,5	4,4	-	14,5	9,4	6,3	21,4	14,7	10,0	28,3	20,1	13,9
Res. Ativ. (kN)		800	1540	-	800	1764	2200	800	1800	2405	800	1800	2558
Eficiência (%)		35	21	-	34	22	15	34	23	16	33	24	17

W (kN)		0,5		1,0		1,5		2,0		2,5		3,0	
H (m)		800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800
SET (mm)		6,73	-0,28	-1,14	11,98	2,13	-1,14	16,31	4,49	-0,15	20,44	6,63	0,92
Golpe/m		148,5	9999,0	-	83,5	470,1	9999,0	61,3	222,7	9999,0	46,9	150,8	1089,3
FMK (kN)		1228,6	1328,8	-	1721,0	1843,4	1964,0	2097,1	2235,3	2372,7	2413,5	2564,7	2715,0
CSX (MPa)		6,259	7,081	-	8,767	9,762	10,350	10,683	11,798	12,491	12,295	13,533	14,294
TSX (MPa)		0,250	0,518	-	0,552	0,829	0,801	1,046	0,883	1,176	1,426	0,850	1,200
ENTHRU (kN)		9,3	5,1	-	18,1	11,3	7,1	26,7	17,9	11,6	35,3	24,8	16,4
Res. Ativ. (kN)		800	1573	-	800	1800	2268	800	1800	2470	800	1800	2648
Eficiência (%)		38	21	-	37	23	14	36	24	16	36	25	17

W (kN)		0,5		1,0		1,5		2,0		2,5		3,0	
H (m)		800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800
SET (mm)		8,22	0,01	-0,97	14,29	2,88	-0,97	19,23	5,67	0,27	23,96	8,13	1,49
Golpe/m		121,6	9999,0	-	70,0	346,8	9999,0	51,7	176,3	3743,1	41,7	123,1	671,8
FMK (kN)		1299,8	1426,7	-	1803,9	1967,4	2112,8	2198,8	2379,8	2546,8	2527,2	2725,6	2910,0
CSX (MPa)		6,598	7,543	-	9,190	10,377	11,003	11,191	12,529	13,270	12,874	14,330	15,161
TSX (MPa)		0,205	0,533	-	0,320	0,743	0,724	0,365	0,860	1,112	0,660	0,823	0,850
ENTHRU (kN)		11,3	5,8	-	21,8	13,3	8,0	32,2	21,1	13,3	42,5	29,1	19,2
Res. Ativ. (kN)		800	1605	-	800	1800	2316	800	1800	2639	800	1800	2744
Eficiência (%)		40	21	-	39	24	14	38	25	16	38	26	17

Estaca média:  $\eta = 65\%$  e  $k = 80 \text{ kN/mm}$

W (kN)	63.6 kN					
	H (m)		F <sub>u</sub> (kN)		F <sub>u</sub> (mm)	
	800	1300	800	1300	800	1300
SEI (mm)	9.76	0.32	-1.81	16.57	3.74	-0.76
G <sub>0</sub> (mm)	102.4	3160.6	9999.0	60.3	267.7	9999.0
F <sub>0</sub> (kN)	1346.3	1523.4	1644.5	1879.8	2098.4	2253.8
C <sub>50</sub> (MPa)	6.942	7.985	8.487	9.636	10.930	11.647
T <sub>50</sub> (MPa)	0.278	0.501	0.416	0.201	0.624	0.641
ENTHRU (kJ)	13.3	6.5	3.9	25.7	15.4	9.0
Res. Attr. (kN)	400	1638	1889	1800	1800	2366
E <sub>0</sub> (%)	42	12	40	24	14	40
	800	1300	800	1300	800	1300
	2.5	12.28	3.65	27.37	9.72	2.12
	31.2	81.4	274.2	36.5	102.8	471.0
	283.2	3203.5	3429.2	2631.1	2894.0	309.4
	14.957	16.865	17.668	13.429	15.043	15.957
	0.492	0.700	0.740	0.336	0.728	0.677
	62.1	44.0	29.4	50.0	34.2	22.3
	800	1300	2800	800	1800	2800
	39	28	18	39	27	18
	39	28	18	39	28	19

70.7 kN		0.5		1.0		1.5		2.0		2.5		3.0	
$W$ (kN)	$H$ (m)	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800
$R_u$ (kN)		11.25	0.67	-1.74	18.75	4.65	-0.46	24.99	8.22	1.25	30.61	11.38	2.89
$\delta_{SET}$ (mm)		88.9	1493.3	9999.0	53.3	215.2	9999.0	40.0	121.6	798.0	32.7	87.9	346.0
$G_{olpe}/m$		1398.6	1615.6	1745.1	1949.7	2204.5	2371.5	2663.0	2864.2	3030.6	3263.9	3303.1	3363.0
$F_{MAX}$ (kN)		7.240	8.406	8.965	10.041	11.437	12.245	12.181	13.727	14.682	13.977	15.866	16.702
$C_{SX}$ (MPa)		0.278	0.387	0.404	0.127	0.346	0.593	0.244	0.686	0.609	0.407	0.690	0.829
$f_{TSX}$ (MPa)		4.2	4.2	4.2	29.6	17.8	10.3	43.5	28.5	17.7	57.4	39.6	25.7
ENTHRU (kJ)		15.3	7.5	4.2	17.8	10.3	4.2	17.7	10.3	4.2	17.7	10.3	4.2
$R_{es\_Ativ.}$ (kN)		800	1878	1929	800	1800	2419	800	1800	2705	800	1800	2800
$E_{Riciencia}$ (%)		43	21	12	42	25	15	41	27	17	41	28	18



Estaca média:  $\eta = 65$  % e  $k = 1200$  kN/mm

W (kN)		7,1 kN				2,0				2,5			
		800	1800	2800	3800	800	1800	2800	3800	800	1800	2800	3800
H (m)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ru (kN)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SET (mm)		-0,59	-	-	-	0,34	-0,17	-	-	1,79	0,47	-0,28	-
Golpe (mm)		9999,0	-	-	-	1184,0	9999,0	-	-	559,8	2112,3	9999,0	-
FMX (kN)		1297,6	-	-	-	2468,0	2444,8	-	-	3195,2	3225,1	3228,0	-
CSX (MPa)		6,813	-	-	-	12,526	12,582	-	-	16,324	16,509	16,509	-
TSX (MPa)		5,107	-	-	-	9,016	7,820	-	-	11,134	7,967	7,967	-
ENT HRU (kJ)		1,5	-	-	-	4,5	4,4	-	-	7,4	7,3	7,3	-
Res. Ativ. (kN)		654	-	-	-	753	1531	-	-	798	2406	2406	-
Eficiência (%)		42	-	-	-	42	41	-	-	42	41	41	-

W (kN)		14,1 kN				2,0				2,5			
		800	1800	2800	3800	800	1800	2800	3800	800	1800	2800	3800
H (m)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ru (kN)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SET (mm)		-0,87	-0,36	-	-	2,24	0,53	-0,37	-	5,07	2,34	0,85	-
Golpe (mm)		1155,9	9999,0	-	-	445,6	1876,2	9999,0	-	197,3	427,2	1170,6	-
FMX (kN)		1747,1	1748,3	-	-	2541,4	2545,7	2548,7	-	4075,4	4099,5	4091,0	-
CSX (MPa)		8,955	9,054	-	-	13,000	13,167	13,301	-	12,913	12,913	12,913	-
TSX (MPa)		6,300	4,891	-	-	8,739	6,432	5,038	-	16,8	16,7	16,5	-
ENT HRU (kJ)		3,5	3,5	-	-	7,0	6,9	6,8	-	20,0	20,0	19,9	-
Res. Ativ. (kN)		754	1533	-	-	800	1661	2425	-	800	1800	2638	-
Eficiência (%)		50	50	-	-	49	48	48	-	48	47	47	-

W (kN)		21,2 kN				2,0				2,5			
		800	1800	2800	3800	800	1800	2800	3800	800	1800	2800	3800
H (m)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ru (kN)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SET (mm)		-2,14	-0,26	-0,66	-	4,18	1,54	0,15	-	9,59	4,23	1,97	-
Golpe (mm)		486,8	3867,8	9999,0	-	239,3	850,5	6730,6	-	104,3	236,6	508,1	-
FMX (kN)		2011,6	2017,3	2019,9	-	2892,7	2901,4	2904,1	-	4621,9	4625,4	4643,8	-
CSX (MPa)		10,368	10,507	10,643	-	14,914	15,143	15,366	-	23,861	24,306	24,741	-
TSX (MPa)		6,423	4,111	2,805	-	8,918	5,519	3,698	-	13,424	7,806	5,201	-
ENT HRU (kJ)		5,7	5,6	5,5	-	11,3	11,1	10,9	-	27,2	26,9	26,8	-
Res. Ativ. (kN)		800	1691	2376	-	800	1769	2519	-	800	1800	2800	-
Eficiência (%)		54	53	52	-	52	52	51	-	51	51	50	-

W (kN)		28,3 kN				2,0				2,5			
		800	1800	2800	3800	800	1800	2800	3800	800	1800	2800	3800
H (m)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ru (kN)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SET (mm)		-3,39	-0,84	-0,40	-	6,84	2,50	0,70	-	14,22	6,14	3,12	-
Golpe (mm)		295,1	1185,9	9999,0	-	150,7	399,7	1427,3	-	70,3	162,8	320,9	-
FMX (kN)		2198,5	2206,3	2215,8	-	3144,2	3155,4	3170,3	-	5011,9	5028,5	5048,1	-
CSX (MPa)		11,353	11,557	11,780	-	16,270	16,586	16,950	-	25,896	26,443	26,972	-
TSX (MPa)		6,099	3,205	1,648	-	8,543	4,550	2,519	-	13,070	6,583	3,846	-
ENT HRU (kJ)		8,0	7,8	7,6	-	16,7	15,3	15,0	-	37,9	37,4	37,0	-
Res. Ativ. (kN)		800	1695	2427	-	800	1800	2612	-	800	1800	2800	-
Eficiência (%)		57	55	54	-	55	54	53	-	54	53	52	-

Estaca média:  $\eta = 86\%$  e  $k = 1200$  kN/mm

35,3 kN		0,5		1,0		1,5		2,0		2,5		3,0	
W (kN)	H (m)	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800
SET (mm)	4,77	1,41	-0,15	1,24	12,90	5,22	2,34	15,97	6,71	3,38	18,68	8,04	4,33
Golpe/m	209,5	711,3	9999,0	107,5	286,3	809,1	77,5	191,5	426,5	296,1	53,5	124,3	231,2
FMX (kN)	2340,5	2351,6	2366,6	3337,9	3355,1	3376,1	4102,2	4122,7	4150,4	4744,5	5308,2	5339,7	5378,4
CSX (MPa)	12,107	12,373	12,664	17,293	17,710	18,138	21,197	21,701	22,210	25,054	27,414	28,009	28,615
TSX (MPa)	5,430	2,199	0,822	7,745	3,257	1,038	9,426	3,933	1,388	10,847	4,463	1,660	1,916
ENTHRU (kJ)	10,2	9,9	9,6	20,1	19,6	19,2	29,7	29,2	28,6	39,3	38,7	38,0	47,4
Res. Ativ. (kN)	800	1765	2469	800	1800	2702	800	1800	2800	800	1800	2800	800
Eficiência (%)	58	56	54	57	56	54	56	55	54	56	55	54	54

42,4 kN		0,5		1,0		1,5		2,0		2,5		3,0	
W (kN)	H (m)	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800
SET (mm)	6,48	1,96	0,14	11,89	4,52	1,77	16,16	6,80	3,17	19,78	8,39	4,44	5,60
Golpe/m	154,3	510,0	7015,9	84,1	221,2	563,9	61,9	151,5	315,8	50,8	119,2	225,2	43,5
FMX (kN)	2466,9	2473,5	13,4	3498,1	3522,2	3557,0	4295,3	4327,2	4371,2	4964,6	5006,2	5060,5	5662,6
CSX (MPa)	12,728	13,067	13,442	18,103	18,591	19,066	22,197	22,746	23,299	25,647	26,244	23,893	28,670
TSX (MPa)	4,815	1,021	0,716	6,880	1,825	0,593	8,211	2,271	0,703	9,593	2,645	0,838	11,076
ENTHRU (kJ)	12,6	12,1	11,7	24,7	24,0	23,4	36,6	35,8	35,1	48,5	47,5	46,6	60,2
Res. Ativ. (kN)	800	1800	2518	800	1800	2792	800	1800	2800	800	1800	2800	800
Eficiência (%)	59	57	55	58	57	55	58	56	55	57	56	55	55

49,5 kN		0,5		1,0		1,5		2,0		2,5		3,0	
W (kN)	H (m)	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800
SET (mm)	8,10	2,55	0,44	14,32	5,57	2,34	19,20	7,99	4,03	23,35	10,07	5,53	6,89
Golpe/m	123,4	392,7	2264,1	69,8	179,7	427,6	52,1	125,2	248,2	42,8	99,3	180,7	146,1
FMX (kN)	2652,2	2578,0	2610,5	3632,4	3668,9	3721,2	4466,2	4505,3	4574,0	5147,8	5211,2	5290,9	5832,2
CSX (MPa)	13,252	13,654	14,068	18,790	19,320	19,848	23,030	23,653	24,299	26,601	27,303	28,068	31,392
TSX (MPa)	3,728	0,408	1,073	5,530	0,580	0,922	7,068	0,717	1,192	8,866	0,976	1,374	10,062
ENTHRU (kJ)	15,1	14,3	13,8	29,5	28,5	27,7	42,5	41,5	41,5	57,8	56,4	55,2	71,9
Res. Ativ. (kN)	800	1800	2568	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800
Eficiência (%)	61	58	56	60	58	56	60	57	56	58	57	56	56

56,5 kN		0,5		1,0		1,5		2,0		2,5		3,0	
W (kN)	H (m)	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800
SET (mm)	9,59	3,15	0,75	16,53	6,61	2,94	21,98	9,37	4,91	26,61	11,72	6,54	8,20
Golpe/m	104,3	317,7	1341,3	60,5	151,3	339,9	46,5	106,8	203,7	37,6	86,3	150,6	122,0
FMX (kN)	2635,4	2669,3	2718,7	3746,2	3797,4	3872,9	4693,6	4681,3	4753,5	5309,6	5389,8	5406,6	6150,7
CSX (MPa)	13,679	14,124	14,589	19,377	19,963	20,603	23,735	24,462	25,231	27,405	28,226	29,116	30,629
TSX (MPa)	2,851	0,504	0,872	4,486	0,701	0,886	6,195	0,863	1,055	7,682	0,969	1,141	9,022
ENTHRU (kJ)	17,5	16,6	15,9	34,2	33,1	32,0	50,7	49,3	47,9	67,1	65,5	63,8	83,4
Res. Ativ. (kN)	800	1800	2619	800	1800	2800	800	1800	2800	800	1800	2800	800
Eficiência (%)	62	59	56	61	59	57	60	58	56	59	58	56	56

Estaca média:  $\eta = 86\%$  e  $k = 1200 \text{ kN/mm}$

w (kN)	63,6 kN									
	0,5		1,0		1,5		2,0		2,5	
H (m)	800	1800	800	1800	800	1800	800	1800	800	1800
SET (mm)	10,97	3,78	19,59	7,68	24,58	10,78	29,68	13,42	34,18	15,76
Golpe (m)	91,1	264,8	53,8	130,2	40,7	92,8	33,7	74,5	29,3	63,5
Fm (kN)	2709,8	2754,0	3846,4	3915,4	4718,4	4804,0	5461,5	5552,5	6090,3	6210,6
Cs (MPa)	14,048	14,546	19,894	20,566	24,357	25,186	28,138	29,059	31,463	32,481
Ts (MPa)	1,975	0,535	3,895	0,469	5,291	0,929	6,893	1,268	7,932	1,544
ENTRU (kN)	19,9	19,1	39,1	38,0	57,8	56,6	76,4	75,1	95,0	93,5
Res. Ativ. (kN)	800	1800	800	1800	800	1800	800	1800	800	1800
Eficiência (%)	63	60	61	60	61	59	60	59	60	57

w (kN)	70,7 kN									
	0,5		1,0		1,5		2,0		2,5	
H (m)	800	1800	800	1800	800	1800	800	1800	800	1800
SET (mm)	12,24	4,43	20,50	8,78	27,00	12,20	32,52	15,11	37,40	17,67
Golpe (m)	81,7	225,9	48,8	113,9	37,0	92,0	30,8	66,2	26,7	56,6
Fm (kN)	2775,0	2834,1	3938,0	4023,4	4826,7	4933,8	5574,0	5700,3	6234,6	6373,6
Cs (MPa)	14,388	14,943	20,351	21,122	24,937	25,847	28,791	29,819	32,182	33,331
Ts (MPa)	1,529	0,460	2,925	0,359	4,432	0,817	5,729	1,247	6,873	1,603
ENTRU (kN)	22,3	21,7	43,8	42,9	65,2	63,8	86,3	84,6	107,3	105,4
Res. Ativ. (kN)	800	1800	800	1800	800	1800	800	1800	800	1800
Eficiência (%)	63	61	62	61	61	60	61	60	61	57

Estaca longa:  $\eta = 30$  % e  $k = 50$  kN/mm

6,0 kN												
Wt (kN)	0,5			1,0			1,5			2,0		
H (m)	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
Ru (kN)	-0,70	-	-	-0,10	-	-	0,39	-1,19	-	0,80	-1,10	-
SET (mm)	9999,0	-	-	9999,0	-	-	2578,6	9999,0	-	1246,4	9999,0	-
Golpe/m	242,4	-	-	343,8	-	-	421,4	422,6	-	486,7	488,1	-
FMS (kN)	2,089	-	-	2,935	-	-	3,673	3,729	-	4,107	4,284	-
CSX (MPa)	1,726	-	-	5,262	-	-	2,541	2,355	-	2,733	2,651	-
ENTHRU (kJ)	0,3	-	-	0,5	-	-	0,8	0,8	-	1,1	1,0	-
Res. Ativ. (kN)	468	-	-	496	-	-	535	1027	-	588	1097	-
Eficiência (%)	10	-	-	8	-	-	9	9	-	9	8	-

12,1 kN												
Wt (kN)	0,5			1,0			1,5			2,0		
H (m)	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
Ru (kN)	-0,04	-	-	1,09	-1,23	-	2,06	-1,11	-	2,96	-1,01	-
SET (mm)	9999,0	-	-	915,0	9999,0	-	485,8	9999,0	-	338,2	9999,0	-
Golpe/m	349,4	-	-	490,3	511,3	-	598,0	621,5	-	688,5	713,7	-
FMS (kN)	2,878	-	-	4,006	4,274	-	4,868	5,162	-	5,593	5,905	-
CSX (MPa)	0,592	-	-	0,944	0,671	-	1,230	0,560	-	1,517	0,806	-
ENTHRU (kJ)	0,8	-	-	1,2	0,8	-	1,9	1,3	-	2,5	1,8	-
Res. Ativ. (kN)	501	-	-	591	1067	-	600	1163	-	600	1209	-
Eficiência (%)	10	-	-	10	7	-	10	7	-	10	7	-

18,1 kN												
Wt (kN)	0,5			1,0			1,5			2,0		
H (m)	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
Ru (kN)	0,87	-1,36	-	2,47	-1,20	-	4,10	-1,03	-	5,52	-0,81	-
SET (mm)	1485,4	9999,0	-	404,1	9999,0	-	243,8	9999,0	-	181,0	9999,0	-
Golpe/m	426,4	469,0	-	594,4	633,1	-	722,6	764,7	-	830,6	874,9	-
FMS (kN)	3,488	3,815	-	4,832	5,230	-	5,858	6,292	-	6,720	7,178	-
CSX (MPa)	0,707	0,749	-	0,799	0,603	-	1,238	0,507	-	1,566	0,841	-
ENTHRU (kJ)	1,1	0,5	-	2,2	1,2	-	3,4	2,0	-	4,5	2,9	-
Res. Ativ. (kN)	558	873	-	600	1087	-	600	1179	-	600	101235	-
Eficiência (%)	12	6	-	12	7	-	13	7	-	12	8	-

24,1 kN												
Wt (kN)	0,5			1,0			1,5			2,0		
H (m)	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
Ru (kN)	1,51	-1,34	-	4,19	-1,19	-	6,40	-0,75	-	8,31	-0,13	-
SET (mm)	660,3	9999,0	-	238,4	9999,0	-	156,3	9999,0	-	120,4	9999,0	-
Golpe/m	489,1	537,7	-	679,3	736,0	-	823,9	884,9	-	946,6	1009,5	-
FMS (kN)	3,981	4,406	-	5,499	6,011	-	6,657	7,217	-	7,830	8,223	-
CSX (MPa)	0,468	0,319	-	1,035	0,330	-	1,474	0,372	-	1,946	0,465	-
ENTHRU (kJ)	1,7	0,7	-	3,4	1,8	-	5,1	3,0	-	6,8	4,3	-
Res. Ativ. (kN)	600	870	-	600	1050	-	600	1185	-	600	1317	-
Eficiência (%)	14	6	-	14	7	-	14	8	-	14	9	-



Estaca longa:  $\eta = 30 \%$  e  $k = 50 \text{ kN/mm}$

W (kN)		54,3 kN											
		H (m)			1,0			1,5			2,0		
		600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
SET (mm)		6,90	-1,18	-	13,54	-0,17	-	18,58	1,01	-1,27	22,88	2,71	-0,96
Golpe/m		144,9	999,0	-	73,8	999,0	-	53,9	995,7	999,0	43,7	369,5	999,0
FMX (kN)		690,4	842,5	-	946,6	1118,5	-	1142,6	1324,0	1424,3	1307,5	1493,7	1614,4
CSX (MPa)		5,675	6,780	-	7,696	9,073	-	9,176	10,676	11,331	10,482	12,105	12,865
TSX (MPa)		0,242	0,159	-	0,271	0,279	-	0,223	0,306	0,344	0,411	0,304	0,411
ENTHRU (kJ)		5,4	1,6	-	11,0	4,5	-	16,3	8,1	4,8	21,4	11,8	7,1
Res. Ativ. (kN)		600	1009	-	600	1308	-	600	1560	1614	600	1600	1831
Eficiência (%)		20	6	-	20	8	-	20	10	6	20	11	7

W (kN)		60,3 kN											
		H (m)			1,0			1,5			2,0		
		600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
SET (mm)		8,47	-1,07	-	15,90	0,16	-1,36	21,46	1,51	-1,15	26,25	3,77	-0,79
Golpe/m		118,1	999,0	-	62,9	6409,8	999,0	46,6	663,4	999,0	38,1	265,0	999,0
FMX (kN)		699,0	863,4	-	959,4	1146,8	1222,4	1162,1	1355,9	1459,5	1331,0	1529,1	1654,0
CSX (MPa)		6,117	7,201	-	8,049	9,786	10,121	9,444	11,396	12,135	10,767	12,995	13,752
TSX (MPa)		0,923	0,860	-	1,067	1,081	1,250	0,492	1,349	1,186	0,313	1,896	1,332
ENTHRU (kJ)		6,6	2,3	-	13,1	5,9	3,8	19,2	10,0	6,4	25,0	14,3	9,3
Res. Ativ. (kN)		600	1057	-	600	1377	1409	600	1600	1672	600	1600	1911
Eficiência (%)		22	8	-	22	10	6	21	11	7	21	12	8

W (kN)		60,3 kN											
		H (m)			1,0			1,5			2,0		
		600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
SET (mm)		8,47	-1,07	-	15,90	0,16	-1,36	21,46	1,51	-1,15	26,25	3,77	-0,79
Golpe/m		118,1	999,0	-	62,9	6409,8	999,0	46,6	663,4	999,0	38,1	265,0	999,0
FMX (kN)		699,0	863,4	-	959,4	1146,8	1222,4	1162,1	1355,9	1459,5	1331,0	1529,1	1654,0
CSX (MPa)		6,117	7,201	-	8,049	9,786	10,121	9,444	11,396	12,135	10,767	12,995	13,752
TSX (MPa)		0,923	0,860	-	1,067	1,081	1,250	0,492	1,349	1,186	0,313	1,896	1,332
ENTHRU (kJ)		6,6	2,3	-	13,1	5,9	3,8	19,2	10,0	6,4	25,0	14,3	9,3
Res. Ativ. (kN)		600	1057	-	600	1377	1409	600	1600	1672	600	1600	1911
Eficiência (%)		22	8	-	22	10	6	21	11	7	21	12	8

W (kN)		60,3 kN											
		H (m)			1,0			1,5			2,0		
		600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
SET (mm)		8,47	-1,07	-	15,90	0,16	-1,36	21,46	1,51	-1,15	26,25	3,77	-0,79
Golpe/m		118,1	999,0	-	62,9	6409,8	999,0	46,6	663,4	999,0	38,1	265,0	999,0
FMX (kN)		699,0	863,4	-	959,4	1146,8	1222,4	1162,1	1355,9	1459,5	1331,0	1529,1	1654,0
CSX (MPa)		6,117	7,201	-	8,049	9,786	10,121	9,444	11,396	12,135	10,767	12,995	13,752
TSX (MPa)		0,923	0,860	-	1,067	1,081	1,250	0,492	1,349	1,186	0,313	1,896	1,332
ENTHRU (kJ)		6,6	2,3	-	13,1	5,9	3,8	19,2	10,0	6,4	25,0	14,3	9,3
Res. Ativ. (kN)		600	1057	-	600	1377	1409	600	1600	1672	600	1600	1911
Eficiência (%)		22	8	-	22	10	6	21	11	7	21	12	8

W (kN)		60,3 kN											
		H (m)			1,0			1,5			2,0		
		600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
SET (mm)		8,47	-1,07	-	15,90	0,16	-1,36	21,46	1,51	-1,15	26,25	3,77	-0,79
Golpe/m		118,1	999,0	-	62,9	6409,8	999,0	46,6	663,4	999,0	38,1	265,0	999,0
FMX (kN)		699,0	863,4	-	959,4	1146,8	1222,4	1162,1	1355,9	1459,5	1331,0	1529,1	1654,0
CSX (MPa)		6,117	7,201	-	8,049	9,786	10,121	9,444	11,396	12,135	10,767	12,995	13,752
TSX (MPa)		0,923	0,860	-	1,067	1,081	1,250	0,492	1,349	1,186	0,313	1,896	1,332
ENTHRU (kJ)		6,6	2,3	-	13,1	5,9	3,8	19,2	10,0	6,4	25,0	14,3	9,3
Res. Ativ. (kN)		600	1057	-	600	1377	1409	600	1600	1672	600	1600	1911
Eficiência (%)		22	8	-	22	10	6	21	11	7	21	12	8

W (kN)		60,3 kN											
		H (m)			1,0			1,5			2,0		
		600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
SET (mm)		8,47	-1,07	-	15,90	0,16	-1,36	21,46	1,51	-1,15	26,25	3,77	-0,79
Golpe/m		118,1	999,0	-	62,9	6409,8	999,0	46,6	663,4	999,0	38,1	265,0	999,0
FMX (kN)		699,0	863,4	-	959,4	1146,8	1222,4	1162,1	1355,9	1459,5	1331,0	1529,1	1654,0
CSX (MPa)		6,117	7,201	-	8,049	9,786	10,121	9,444	11,396	12,135	10,767	12,995	13,752
TSX (MPa)		0,923	0,860	-	1,067	1,081	1,250	0,492	1,349	1,186	0,313	1,896	1,332
ENTHRU (kJ)		6,6	2,3	-	13,1	5,9	3,8	19,2	10,0	6,4	25,0	14,3	9,3
Res. Ativ. (kN)		600	1057	-	600	1377	1409	600	1600	1672	600	1600	1911
Eficiência (%)		22	8	-	22	10	6	21	11	7	21	12	8

W (kN)		60,3 kN											
		H (m)			1,0			1,5			2,0		
		600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
SET (mm)		8,47	-1,07	-	15,90	0,16	-1,36	21,46	1,51	-1,15	26,25	3,77	-0,79
Golpe/m		118,1	999,0	-	62,9	6409,8	999,0	46,6	663,4	999,0	38,1	265,0	999,0
FMX (kN)		699,0	863,4	-	959,4	1146,8	1222,4	1162,1	1355,9	1459,5	1331,0	1529,1	1654,0
CSX (MPa)		6,117	7,201	-	8,049	9,786	10,121	9,444	11,396	12,135	10,767	12,995	13,752
TSX (MPa)		0,923	0,860	-	1,067	1,081	1,250	0,492	1,349	1,186	0,313	1,896	1,332
ENTHRU (kJ)		6,6	2,3	-	13,1	5,9	3,8	19,2	10,0	6,4	25,0	14,3	9,3
Res. Ativ. (kN)		600	1057	-	600	1377	1409	600	1600	1672	600	1600	1911
Eficiência (%)		22	8	-	22	10	6	21	11	7	21	12	8

W (kN)		60,3 kN											
		H (m)			1,0			1,5			2,0		
		600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
SET (mm)		8,47	-1,07	-	15,90	0,16	-1,36	21,46	1,51	-1,15	26,25	3,77	-0,79
Golpe/m		118,1	999,0	-	62,9	6409,8	999,0	46,6	663,4	999,0	38,1	265,0	999,0
FMX (kN)		699,0	863,4	-	959,4	1146,8	1222,4	1162,1	1355,9	1459,5	1331,0	1529,1	1654,0
CSX (MPa)		6,117	7,201	-	8,049	9,786	10,121	9,444	11,396	12,135	10,767	12,995	13,752
TSX (MPa)		0,923	0,860	-	1,067	1,081	1,250	0,492	1,349	1,186	0,313	1,896	1,332
ENTHRU (kJ)		6,6	2,3	-	13,1	5,9	3,8	19,2	10,0	6,4	25,0	14,3	9,3
Res. Ativ. (kN)		600	1057	-	600	1377	1409	600	1600	1672	600	1600	1911
Eficiência (%)		22	8	-	22	10	6	21	11	7	21	12	8

W (kN)		60,3 kN																	
		H (m)			1,0			1,5			2,0			2,5			3,0		
		600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
SET (mm)		8,47	-1,07	-	15,90	0,16	-1,36	21,46	1,51	-1,15	26,25	3,77	-0,79	30,88	6,06	-0,26	35,28	8,35	0,28
BU (kN)		118,1	9099,0	-	62,9	6409,8	9099,0	46,6	663,4	9099,0	38,1	265,0	9099,0	32,4	165,0	9099,0	28,3	119,8	3699,8
G (kN)		699,0	863,4	-	959,4	1146,8	1222,4	1162,1	1355,9	1459,5	1331,0	1529,1	1654,0	1479,8	1681,3	1822,0	1614,3	1819,0	1971,7
FSX (MPa)		6,117	7,301	-	8,049	9,786	10,121	9,444	11,396	12,135	10,767	12,995	13,752	11,927	14,393	15,102	12,973	15,594	16,288
FSX (MPa)		0,923	0,860	-	1,067	1,081	1,250	0,492	1,349	1,186	0,313	1,896	1,332	0,392	2,310	1,509	0,371	2,489	1,669
ENT HRU (k-d)		6,6	2,3	-	13,1	5,9	3,8	19,2	10,0	6,4	25,0	14,3	9,3	30,9	18,7	12,4	36,6	23,5	15,7
Res. Atw. (kN)		600	1057	-	600	1377	1409	600	1600	1672	600	1600	1911	600	1600	2094	600	1600	2280
Efficiencia (%)		22	8	-	22	10	6	21	11	7	21	12	8	20	12	8	20	13	9

Estaca longa:  $\eta = 30\%$  e  $k = 1200 \text{ kN/m}$

6,0 kN												
W (kN)	0,5				1,0				1,5			
H (m)	600	1600	2600		600	1600	2600		600	1600	2600	
SET (mm)	-0,01	-	-		0,72	-0,43	-		1,26	-0,08	-	
Golpe/m	9999,0	-	-		1399,3	9999,0	-		793,7	9999,0	-	
FMX (kN)	637,4	-	-		976,9	978,0	-		1240,6	1257,3	-	
CSX (MPa)	5,100	-	-		7,772	7,787	-		9,958	9,983	-	
TSX (MPa)	3,393	-	-		4,214	4,569	-		5,266	4,988	-	
ENTHRU (kJ)	0,6	-	-		1,3	1,3	-		2,0	2,0	-	
Res. Ativ. (kN)	50,3	-	-		562	1253	-		600	1327	-	
Eficiência (%)	20	-	-		22	22	-		22	22	-	

12,1 kN												
W (kN)	0,5				1,0				1,5			
H (m)	600	1600	2600		600	1600	2600		600	1600	2600	
SET (mm)	1,16	-0,43	-		2,46	0,35	-0,59		3,48	0,94	-0,19	
Golpe/m	864,5	9999,0	-		406,5	2847,3	9999,0		287,7	1065,5	9999,0	
FMX (kN)	852,0	855,1	-		1280,9	1286,3	1291,1		1615,3	1619,6	1623,2	
CSX (MPa)	6,852	6,907	-		10,293	10,481	10,675		12,911	13,166	13,385	
TSX (MPa)	3,953	2,388	-		5,680	3,179	2,188		6,955	3,899	2,379	
ENTHRU (kJ)	1,5	1,5	-		3,1	3,1	3,0		4,7	4,6	4,5	
Res. Ativ. (kN)	597	1289	-		600	1419	2024		600	1544	2118,0	
Eficiência (%)	25	25	-		26	26	25		26	25	25	

18,1 kN												
W (kN)	0,5				1,0				1,5			
H (m)	600	1600	2600		600	1600	2600		600	1600	2600	
SET (mm)	2,18	-0,07	-		4,09	0,96	-0,31		5,57	1,74	0,25	
Golpe/m	459,1	9999,0	-		244,3	1046,3	9999,0		179,6	574,4	4034,7	
FMX (kN)	978,2	985,2	-		1453,8	1461,6	1467,6		1809,9	1818,2	1822,6	
CSX (MPa)	7,891	8,104	-		11,580	11,934	12,174		14,490	14,785	15,031	
TSX (MPa)	3,897	1,713	-		5,736	2,160	1,281		7,070	2,601	1,201	
ENTHRU (kJ)	2,5	2,4	-		5,0	4,8	4,7		7,4	7,3	7,1	
Res. Ativ. (kN)	600	1328	-		600	1548	2078		600	1600	2270	
Eficiência (%)	28	27	-		28	27	26		27	27	26	

24,1 kN												
W (kN)	0,5				1,0				1,5			
H (m)	600	1600	2600		600	1600	2600		600	1600	2600	
SET (mm)	3,19	-0,25	-0,83		5,69	1,48	-0,03		8,01	2,57	0,61	
Golpe/m	313,2	3936,8	9999,0		175,6	874,5	9999,0		124,9	399,1	1638,0	
FMX (kN)	1067,1	1078,0	1090,6		1567,2	1579,8	1592,2		1943,0	1952,9	1966,5	
CSX (MPa)	8,598	8,856	9,125		12,609	12,875	13,156		15,565	15,870	16,160	
TSX (MPa)	3,873	1,447	0,893		5,541	1,443	1,039		6,960	1,771	1,095	
ENTHRU (kJ)	3,4	3,3	3,1		6,8	6,6	6,5		10,1	9,9	9,8	
Res. Ativ. (kN)	600	1398	1895		600	1600	2174		600	1600	2396	
Eficiência (%)	28	27	26		28	27	27		28	27	27	

Estaca longa:  $\eta = 30$  % e  $k = 1200$  kN/mm

30.2 kN		1.0			1.5			2.0			2.5			3.0		
W (kN)	H (m)	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
Ru (kN)		4.21	0.55	-0.76	7.46	2.05	0.21	10.77	3.43	0.93	13.68	4.67	1.56	16.30	5.80	2.22
SET (mm)		237.3	1816.8	9999.0	134.1	487.7	4709.1	92.9	291.2	1071.3	73.1	213.9	642.5	61.3	172.3	460.7
Golpe (mm)		1135.3	1151.0	1171.4	1655.1	1670.7	1689.1	2042.3	2059.0	2078.5	2366.8	2384.8	2405.1	2652.5	2668.8	2691.2
FMX (kN)		9.137	9.430	9.739	13.286	13.590	13.911	16.380	16.705	17.036	18.964	19.246	19.665	21.214	21.598	21.972
CSX (MPa)		3.262	1.012	0.978	5.095	0.877	1.109	6.527	0.799	1.249	7.834	1.012	1.466	9.035	1.177	1.584
TSX (MPa)		4.4	4.2	4.0	8.7	8.5	8.3	12.9	12.7	12.4	17.1	16.8	16.6	21.3	21.0	20.7
ENTRU (kN)		600	1461	1919	600	1600	2258	600	1600	2508	600	1600	2600	600	1600	2600
Res. Ativ. (kN)		29	28	27	28	28	27	28	28	27	28	28	27	28	28	27
Eficiência (%)																

36.2 kN		0.5			1.0			1.5			2.0			2.5			3.0		
W (kN)	H (m)	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
SET (mm)	5.22	0.82	-0.66	0.43	13.58	4.30	1.22	17.09	5.80	2.03	20.24	7.16	2.86	23.11	8.41	3.87			
Golpe (mm)	191.6	1224.2	9999.0	2.6	380.4	2315.3	73.8	232.4	818.2	482.1	49.4	139.8	349.4	43.3	118.9	272.7			
FMX (kN)	1187.4	1209.7	1238.4	1722.1	1742.4	1767.8	2120.9	2142.8	2168.7	2455.9	2477.7	2506.3	2531.3	3011.2	3039.4	3069.7			
CSX (MPa)	9.566	9.893	10.274	13.811	14.158	14.541	17.000	17.372	17.769	19.668	20.052	20.484	20.913	24.132	24.559	25.015			
TSX (MPa)	2.731	0.764	1.319	4.468	0.504	1.247	5.873	0.448	1.374	7.225	0.564	1.325	0.631	9.590	0.678	1.350			
ENTRU (kN)	5.3	5.1	4.9	10.6	10.3	10.0	15.8	15.4	15.1	20.9	20.5	20.1	25.9	31.0	30.5	30.1			
Res. Ativ. (kN)	600	1518	1956	600	1600	2334	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	
Eficiência (%)	29	28	27	29	28	28	29	28	28	29	29	28	28	29	28	28	29	28	28

42.2 kN		1.0			1.5			2.0			2.5			3.0		
W (kN)	H (m)	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
SET (mm)	6.23	1.06	-0.55	0.84	16.37	5.19	1.54	20.43	6.94	2.54	24.06	8.53	3.54	27.37	9.99	4.50
Golpe (mm)	160.6	942.8	9999	85.6	310.0	1707.0	61.1	192.7	660.2	48.9	41.6	117.3	36.5	100.1	222.4	
FMX (kN)	1231.9	1259.3	1296.9	1775.3	1835.2	2184.9	2212.2	2246.8	2525.9	2555.1	2591.5	2628.5	2858.9	2894.6	3169.9	
CSX (MPa)	9.909	10.29	10.748	14.254	14.636	15.088	17.507	17.927	18.397	20.251	20.687	21.178	21.647	23.113	23.620	25.828
TSX (MPa)	2.131	0.494	0.962	3.738	0.407	0.992	5.205	0.407	0.772	6.536	0.468	0.734	0.673	7.847	0.461	0.589
ENTRU (kN)	6.4	6	5.7	12.6	12.1	11.8	18.6	18.1	17.7	24.7	24.1	23.7	29.6	36.8	36.0	35.5
Res. Ativ. (kN)	600	1570	1994	600	1600	2405	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	2600
Eficiência (%)	30	28	27	30	29	28	29	29	28	29	29	29	28	29	28	28

48.3 kN																			
W (kN)		0.5			1.0			1.5			2.0			2.5			3.0		
H (m)		600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
SET (mm)		7.34	1.30	-0.44	13.81	3.85	0.83	19.08	6.11	1.90	23.63	8.12	3.09	27.70	9.94	4.26	31.40	11.62	5.37
Golpe (mm)		136.2	770.6	9999.0	72.4	259.7	1205.5	52.4	163.5	527.2	42.3	123.1	323.2	36.1	100.6	234.7	31.8	86.0	186.1
FMX (kN)		1288.6	1302.6	1349.2	1822.5	1853.2	1894.8	2238.7	2271.4	2313.5	2589.2	2623.3	2666.4	2896.2	2932.6	2976.4	3172.4	3210.7	3257.7
CSX (MPa)		10.210	10.639	11.162	14.614	15.059	15.588	17.949	18.409	18.938	20.725	21.230	21.783	23.190	23.698	24.178	25.408	25.936	26.540
TSX (MPa)		1.512	0.432	0.691	3.044	0.390	0.830	4.538	0.387	0.867	5.793	0.469	0.547	6.936	0.578	0.542	7.960	0.670	0.544
ENTRU (kN)		7.4	7.0	6.6	14.6	14.0	13.6	21.6	20.9	20.5	28.5	27.8	27.3	34.2	35.5	34.2	42.3	41.6	41.0
Res. Ativ. (kN)		600	1600	2031	600	1600	2472	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
Eficiência (%)		31	29	27	30	29	28	30	29	28	30	29	28	30	29	28	30	29	28



Estaca longa:  $\eta = 30 \%$  e  $k = 1200 \text{ kN/mm}$ 

w (kN)		54.3 kN																	
		0.5			1.0			1.5			2.0			2.5			3.0		
H (m)		600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
SET (mm)		8.62	1.56	-0.34	15.75	4.48	1.01	21.53	7.05	2.28	26.53	9.31	3.86	31.01	11.36	5.00	35.07	13.24	6.27
Golpe/m		116.0	641.6	9999.0	63.5	223.0	980.5	46.4	141.9	439.0	37.7	107.4	273.0	32.3	88.0	200.1	28.5	76.5	169.6
F <sub>MX</sub> (kN)		1300.7	1339.6	1395.7	1860.8	1898.1	1947.0	2284.8	2323.1	2372.7	2639.7	2680.8	2731.7	2953.6	2994.7	3047.3	3236.4	3279.7	3334.0
C <sub>50</sub> (MPa)		10.468	10.940	11.525	14.936	15.418	15.981	18.313	18.826	19.403	21.165	21.684	22.301	23.646	24.212	24.842	25.886	26.490	27.151
T <sub>SX</sub> (MPa)		0.942	0.401	0.647	2.480	0.386	0.720	3.654	0.561	0.570	5.031	0.738	0.526	6.099	0.832	0.461	7.078	0.877	0.480
ENTHRU (kJ)		8.4	7.9	7.5	16.6	15.8	15.4	24.6	23.8	23.2	32.4	31.7	31.0	40.1	39.6	38.7	47.9	47.4	46.5
Res. Ativ. (kN)		600	1600	2068	600	1600	2534	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
Eficiência (%)		31	29	28	31	29	28	30	29	28	30	29	29	30	29	29	29	29	29

w (kN)		60.3 kN																	
		0.5			1.0			1.5			2.0			2.5			3.0		
H (m)		600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
Ru (kN)		9.77	1.71	-0.27	17.63	4.92	1.09	24.05	7.78	2.49	29.42	10.34	4.03	34.25	12.67	5.54	39.19	14.83	6.98
SET (mm)		102.3	585.9	9999.0	56.7	203.2	917.0	41.6	128.5	401.2	34.0	96.7	247.8	29.2	78.9	180.6	25.5	67.4	143.3
Golpe/m		1309.8	1314.2	1318.6	1876.8	1881.4	1885.7	2306.2	2310.2	2315.5	2664.7	2670.8	2675.8	2982.1	2988.2	2993.6	3268.5	3274.4	3280.3
F <sub>MX</sub> (kN)		10.572	10.722	10.898	15.075	15.232	15.412	18.484	18.667	18.850	21.366	21.546	21.743	23.883	24.079	24.279	26.158	26.361	26.585
C <sub>50</sub> (MPa)		1.054	0.650	0.962	0.823	1.231	0.890	2.040	1.688	1.361	3.075	1.841	1.570	4.006	1.844	1.667	4.885	1.810	1.749
T <sub>SX</sub> (MPa)		9.4	9.0	8.7	18.7	18.1	17.4	27.7	26.9	26.1	36.7	35.8	34.8	46.7	44.6	43.5	54.6	53.4	52.2
ENTHRU (kJ)		600	1600	2090	600	1600	2562	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
Res. Ativ. (kN)		31	30	29	31	30	29	31	30	29	30	30	29	30	30	29	30	30	29
Eficiência (%)																			

Estaca longa:  $\eta = 65\%$  e  $k = 50$  kN/mm

W (kN)		6,0 kN																	
		0,5			1,0			1,5			2,0			2,5			3,0		
H (m)	Ru (kN)	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
SET (mm)	-0,01	-	-	-	0,93	-1,08	-	1,88	-0,86	-	2,37	-0,55	-	3,01	-0,24	-	3,80	0,04	-
Golpe (mm)	9999,0	-	-	-	1076,9	9999,0	-	596,8	9999,0	-	421,9	9999,0	-	332,6	9999,0	-	277,9	9999,0	-
FmX (kN)	357,9	-	-	-	506,5	508,0	-	620,2	621,9	-	715,8	717,6	-	799,9	802,1	-	875,9	878,4	-
CsX (MPa)	3,051	-	-	-	4,269	4,452	-	5,196	5,414	-	5,974	6,213	-	6,657	6,915	-	7,272	7,547	-
TsX (MPa)	2,317	-	-	-	2,785	2,727	-	3,051	3,050	-	3,289	3,201	-	3,657	3,422	-	3,561	3,555	-
ENTHRU (kJ)	0,6	-	-	-	1,1	1,1	-	1,7	1,8	-	2,3	2,1	-	2,8	2,7	-	3,4	3,2	-
Res. Ativ. (kN)	503	-	-	-	578	1114	-	600	1197	-	600	1226	-	600	1059	-	600	1353	-
Eficiência (%)	20	-	-	-	18	18	-	19	18	-	19	18	-	19	18	-	19	18	-

w (kN)		12,1 kN																	
		0,5			1,0			1,5			2,0			2,5			3,0		
H (m)	Ru (kN)	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
SET (mm)	1,25	-1,21	-	-	3,24	-0,93	-	4,90	-0,30	-	6,35	0,29	-1,26	7,66	0,81	-1,19	8,85	1,27	-0,99
Golpe (mm)	795,5	9999,0	-	-	308,8	9999,0	-	204,1	9999,0	-	157,4	3414,8	9999,0	130,6	1233,8	9999,0	112,9	785,3	9999,0
FmX (kN)	509,9	531,4	-	-	716,1	741,7	-	873,8	902,0	-	1006,7	1036,5	1065,6	1123,5	1154,9	1185,3	1229,2	1261,7	1293,2
CsX (MPa)	4,163	4,436	-	-	5,814	6,131	-	7,076	7,420	-	8,138	8,502	8,820	9,073	9,452	9,787	9,918	10,310	10,668
TsX (MPa)	0,981	0,845	-	-	1,585	0,879	-	1,986	1,149	-	2,626	1,377	1,468	3,183	1,291	1,354	3,690	1,221	1,270
ENTHRU (kJ)	1,4	0,9	-	-	2,7	2,0	-	3,1	2,0	-	5,5	4,3	3,2	6,9	5,5	4,2	8,4	6,7	5,3
Res. Ativ. (kN)	600	1089	-	-	600	1224	-	600	1280	-	600	1406	1754	600	1517	1823	600	1600	1901
Eficiência (%)	23	15	-	-	22	17	-	23	17	-	23	18	13	23	18	14	23	18	15

W (kN)		18,1 kN																	
		0,5			1,0			1,5			2,0			2,5			3,0		
H (m)	Ru (kN)	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
SET (mm)	2,76	-1,18	-	-	5,96	-0,46	-	8,54	0,47	-1,31	10,77	1,24	-1,10	12,77	2,13	-0,79	14,86	3,07	-0,40
Golpe (mm)	361,9	9999,0	-	-	187,7	9999,0	-	117,1	2139,7	9999,0	92,8	805,9	9999,0	78,3	470,5	9999,0	68,2	326,2	9999,0
FmX (kN)	617,7	657,1	-	-	863,4	908,5	-	1051,4	1099,8	1146,1	1209,7	1260,7	1308,7	1349,1	1402,0	1452,1	1475,0	1529,8	1581,6
CsX (MPa)	5,019	5,424	-	-	6,983	7,448	-	8,487	8,986	9,408	9,752	10,278	10,731	10,866	11,413	11,890	11,872	12,437	12,934
TsX (MPa)	0,881	0,557	-	-	1,610	0,742	-	1,719	1,093	1,007	2,232	0,970	0,843	2,686	1,126	0,971	3,100	1,247	0,914
ENTHRU (kJ)	2,4	1,4	-	-	4,9	3,2	-	7,4	5,2	6,5	9,8	7,2	5,1	12,3	9,3	6,8	14,8	11,5	8,8
Res. Ativ. (kN)	600	1106	-	-	600	1246	-	600	1444	1655	600	1600	1794	600	1600	1911	600	1600	2044
Eficiência (%)	27	15	-	-	27	18	-	27	19	24	27	20	14	27	21	15	27	21	16

W (kN) H (m)		24,1 kN																	
		0,5			1,0			1,5			2,0			2,5			3,0		
	Ru (kN)	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
SET (mm)		4,59	-1,15	-	8,90	0,07	-	12,36	1,20	-1,17	15,32	2,53	-0,79	18,40	3,95	-0,28	21,87	5,33	0,21
Golpe (mm)		217,8	9999,0	-	112,3	9999,0	-	80,9	834,6	9999,0	65,3	394,9	9999,0	54,4	253,1	9999,0	46,1	187,7	4855,9
FmX (kN)		705,6	763,2	-	982,7	1047,4	-	1194,8	1263,7	1326,3	1373,2	1446,5	1511,9	1530,5	1605,5	1674,7	1672,6	1749,9	1821,5
CsX (MPa)		5,710	6,231	-	7,927	8,528	-	9,622	10,270	10,803	11,048	11,732	12,308	12,304	13,015	13,624	13,439	14,174	14,810
TsX (MPa)		1,118	0,333	-	1,639	0,500	-	1,951	0,528	0,545	2,354	0,527	0,622	2,684	0,561	0,632	2,979	0,585	0,601
ENTHRU (kJ)		3,7	2,0	-	7,4	4,7	-	11,1	7,7	5,0	14,8	10,7	7,4	18,6	13,8	9,9	22,3	16,9	12,5
Res. Ativ. (kN)		600	1073	-	600	1359	-	600	1600	1708	600	1600	1911	600	1600	2088	600	1600	2255
Eficiência (%)		31	17	-	31	20	-	31	21	14	31	22	16	31	23	16	31	23	17

Estaca longa:  $\eta = 65\%$  e  $k = 50 \text{ kN/mm}$

W (kN)		30.2 kN																	
		0.5		1.0		1.5		2.0		2.5		3.0							
H (m)	Ru (kN)	600	1800	2600	600	1800	2600	600	1800	2600	600	1800	2600	600	1800	2600	600	1800	2600
ET (mm)	6.44	-0.98	-	-	11.75	0.67	-1.33	16.00	2.23	-0.97	20.32	4.11	-0.34	24.77	5.91	0.27	28.86	7.63	0.82
Golpe (mm)	155.3	9999.0	-	-	85.1	1499.0	-	62.5	447.8	9999.0	48.2	243.6	9999.0	40.5	169.1	3657.1	34.7	131.0	1213.7
FMX (kN)	781.6	855.3	-	-	1085.5	1168.5	1238.6	1318.0	1406.6	1484.5	1513.7	1606.6	1689.6	1686.2	1782.4	1869.4	1842.0	1941.2	2031.4
CSX (MPa)	6.263	7.064	-	-	8.693	9.513	10.328	10.549	11.316	12.317	12.111	12.907	13.932	13.487	14.317	15.385	14.730	15.590	16.677
TSX (MPa)	1.172	0.368	-	-	1.350	0.366	0.560	1.811	0.482	0.611	2.111	0.424	0.577	2.386	0.599	0.585	2.639	0.653	0.601
ENT HRU (kN)	5.1	2.6	-	-	10.1	6.2	3.7	15.1	10.1	6.6	20.2	14.2	9.7	25.3	18.3	12.9	30.5	22.5	16.3
Res. Ativ. (kN)	600	1120	-	-	600	1486	1565	600	1800	1828	600	1600	2066	600	1600	2279	600	1600	2470
Eficiência (%)	34	17	-	-	33	21	12	33	22	15	33	24	16	34	24	17	34	25	18

W (kN)		36.2 kN																	
		0.5		1.0		1.5		2.0		2.5		3.0							
H (m)	Ru (kN)	600	1800	2600	600	1800	2600	600	1800	2600	600	1800	2600	600	1800	2600	600	1800	2600
ET (mm)	8.33	-0.69	-	-	14.75	1.16	-1.26	20.03	3.36	-0.64	25.66	5.78	0.09	30.79	8.03	0.75	35.50	10.13	1.36
Golpe (mm)	120.1	9999.0	-	-	67.8	869.5	9999.0	48.9	297.8	9999.0	38.0	173.2	9999.0	32.5	124.5	1332.8	28.2	98.7	733.2
FMX (kN)	844.4	933.4	-	-	1171.2	1269.7	1358.1	1421.1	1526.2	1622.2	1631.5	1741.6	1842.6	1816.7	1931.0	2036.1	1984.1	2102.1	2210.6
CSX (MPa)	6.718	7.834	-	-	9.318	10.611	11.383	11.306	12.712	13.318	12.979	14.442	15.462	14.463	15.946	17.066	15.784	17.298	18.503
TSX (MPa)	0.915	0.373	-	-	1.310	0.374	0.600	1.793	0.394	0.601	2.134	0.485	0.611	2.436	0.437	0.624	2.688	0.465	0.651
ENTHRU (kN)	6.6	3.1	-	-	13.1	7.7	4.5	19.5	12.8	8.0	25.9	18.0	11.9	32.4	23.3	16.1	38.9	28.5	20.4
Res. Ativ. (kN)	600	1197	-	-	600	1592	1629	600	1800	1957	600	1600	2215	600	1600	2444	600	1600	1600
Eficiência (%)	38	17	-	-	38	21	12	38	24	15	38	25	16	38	26	18	38	26	19

W (kN)		42.2 kN																	
		0.5		1.0		1.5		2.0		2.5		3.0							
H (m)	Ru (kN)	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
ET (mm)		10.31	-0.42	-	17.84	1.67	-1.11	24.53	4.67	-0.35	30.87	7.54	0.43	36.64	10.17	1.13	41.97	12.62	2.13
Golpe (mm)		97.0	9999.0	-	56.0	569.2	9999.0	40.8	214.4	9999.0	32.4	132.6	2299.9	27.3	98.3	886.3	23.8	79.2	468.9
FMX (kN)		897.2	1012.0	-	1243.2	1363.3	1473.7	1507.8	1632.2	1757.9	1730.7	1859.4	1993.5	1926.9	2059.8	2199.4	2104.2	2240.9	2384.7
CSX (MPa)		7.318	8.409	-	9.890	11.389	12.177	11.906	13.641	14.577	13.769	15.521	16.559	15.329	17.155	18.282	16.739	18.618	19.828
TSX (MPa)		0.648	0.396	-	1.180	0.345	0.583	1.706	0.366	0.606	2.073	0.387	0.620	2.355	0.342	0.632	2.651	0.469	0.616
ENT HRU (kN)		8.3	3.6	-	16.3	9.4	5.4	24.1	15.6	9.7	32.0	21.9	14.6	39.9	28.2	19.6	47.7	34.7	24.9
Res. Ativ. (kN)		600	1254	-	600	1600	1744	600	1600	2061	600	1600	2335	600	1600	2576	600	1600	2600
Eficiência (%)		39	17	-	39	22	13	38	25	15	38	26	17	38	27	19	38	27	20

W (kN)		48.3 kN																	
		0.5		1.0		1.5		2.0		2.5		3.0							
H (m)	Ru (kN)	600	1800	2600	600	1800	2600	600	1800	2600	600	1800	2600	600	1800	2600	600	1800	2600
ET (mm)	12.40	-0.19	-	-	21.00	2.46	-0.97	28.94	6.04	-0.10	36.07	9.34	0.76	42.52	12.44	1.75	48.44	15.34	3.21
Golpe (mm)	80.7	9999.0	-	-	47.6	407.7	9999.0	34.6	165.7	9999.0	27.7	107.1	1310.3	23.5	80.4	570.9	20.6	66.2	311.6
FMX (kN)	942.8	1088.8	-	-	1305.1	1469.0	1579.0	1582.4	1741.0	1882.1	1815.9	1978.5	2132.7	2021.4	2187.9	2351.3	2207.1	2377.2	2547.9
CSX (MPa)	7.542	8.875	-	-	10.383	12.026	12.813	12.589	14.397	15.347	14.446	16.375	17.443	16.081	18.103	19.263	17.559	19.658	20.893
TSX (MPa)	0.337	0.402	-	-	0.848	0.353	0.626	1.472	0.368	0.641	1.885	0.385	0.626	2.214	0.400	0.605	2.492	0.462	0.596
ENT HRU (kN)	10.1	4.3	-	-	19.7	11.2	6.7	29.1	18.5	11.8	38.4	25.9	17.5	47.8	33.7	23.5	57.2	41.7	29.6
Res. Ativ. (kN)	600	1304	-	-	600	1800	1828	600	1800	2149	600	1600	2449	600	1600	2600	600	1600	2600
Eficiência (%)	42	18	-	-	41	23	14	40	26	16	40	27	18	40	28	19	39	29	20

Estaca longa:  $\eta = 65\%$  e  $k = 50 \text{ kN/mm}$

54.3 kN		54.3 kN																	
		0.5			1.0			1.5			2.0			2.5			3.0		
W (kN)	H (m)	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
SET (mm)	14.46	0.03	-	24.30	3.35	-0.83	0.23	33.12	7.43	0.23	40.98	11.26	1.16	48.04	14.79	2.63	54.51	18.06	4.38
Golpe (mm)	69.2	9999.0	-	41.2	298.4	9999.0	4261.2	30.2	13.45	4261.2	24.4	88.8	888.9	20.8	67.6	380.6	18.3	55.4	228.5
FMS (kN)	982.2	1155.7	-	1357.8	1545.3	1671.4	1991.5	1646.6	1839.4	1991.5	1888.1	2087.3	2255.6	2101.5	2305.9	2485.7	2294.3	2503.6	2692.3
CSX (MPa)	7.977	9.386	-	10.879	12.540	13.321	15.964	13.147	15.009	15.964	15.053	17.073	18.148	16.730	18.879	20.046	18.252	20.502	21.746
TSX (MPa)	0.262	0.284	-	0.436	0.318	0.431	0.497	1.048	0.331	0.497	1.503	0.344	0.539	1.862	0.355	0.530	2.160	0.475	0.542
ENT HRU (kN)	11.9	5.0	-	23.1	13.1	8.0	13.9	34.0	21.3	13.9	44.9	30.3	20.5	55.7	39.5	27.4	66.6	49.0	34.3
Res. Ativ. (kN)	600	1351	-	600	1600	1893	2265	600	1600	2588	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
Eficiência (%)	44	18	-	43	24	15	17	42	26	17	41	28	19	41	29	20	41	30	21

W (kN)		60.3 kN																	
		0.5			1.0			1.5			2.0			2.5			3.0		
H (m)	Ru (kN)	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
SET (mm)		16.91	0.26	-1.23	27.82	4.54	-0.82	37.39	9.46	0.53	45.88	13.87	1.76	53.51	17.85	3.83	60.49	21.50	5.96
Golpe (mm)		59.1	2750.5	9999.0	35.9	220.3	9999.0	26.7	105.8	1877.7	21.8	72.1	567.3	18.7	56.0	261.1	16.5	46.5	167.7
FMS (kN)		995.9	1183.8	1265.9	1382.4	1581.8	1712.5	1677.4	1883.6	2041.2	1926.1	2138.7	2312.6	2146.3	2364.2	2549.4	2343.4	2568.4	2762.8
CSX (MPa)		8.323	10.114	10.514	11.168	13.497	14.219	13.464	16.129	16.829	15.417	18.189	19.277	17.147	19.950	21.592	18.709	21.587	23.619
TSX (MPa)		1.028	1.120	1.294	0.360	2.070	1.306	0.342	2.590	1.717	0.244	2.836	2.008	0.522	2.981	2.449	0.764	3.050	2.915
ENTHRU (kN)		14.2	6.5	4.2	27.1	15.7	10.3	38.5	26.0	17.5	52.0	36.8	25.2	64.4	47.9	33.0	76.8	59.1	40.8
Res. Ativ. (kN)		600	1422	1457	600	1600	1968	600	1600	2369	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
Eficiência (%)		47	22	14	45	26	17	44	29	19	43	31	21	43	32	22	42	33	23

Estaca longa:  $\eta = 65\%$  e  $k = 1200 \text{ kN/mm}$

W (kN)		6,0 kN									
		0,5		1,0		1,5		2,0		2,5	
H (m)	Ru (kN)	600	1800	2600	600	1800	2600	600	1800	2600	600
SET (mm)		0,82	-0,37	-	1,84	0,31	-0,46	3,31	0,21	0,48	4,75
Golpe/m		123,7	999,0	-	542,1	319,9	999,0	301,9	814,6	2084,1	210,5
FMS (kN)		1026,8	1027,2	-	1563,2	1561,3	1560,8	2272,7	2289,1	2568,5	2831,8
CSX (MPa)		8,169	8,172	-	12,436	12,421	12,468	18,081	18,210	20,486	22,528
TSX (MPa)		4,423	4,639	-	6,288	5,187	4,974	8,568	5,241	5,110	10,173
ENTHRU (kJ)		1,4	1,4	-	2,9	2,9	4,4	5,8	5,8	7,2	8,6
Res. Ativ. (kN)		569	1266	-	600	1411	2024,0	600	1600	2350	600
Eficiência (%)		47	47	-	48	48	48	48	48	48	48

W (kN)		12,1 kN									
		0,5		1,0		1,5		2,0		2,5	
H (m)	Ru (kN)	600	1800	2600	600	1800	2600	600	1800	2600	600
SET (mm)		2,65	0,46	-0,52	4,58	1,56	0,27	8,15	3,25	1,77	11,20
Golpe/m		378,0	2165,6	999,0	218,1	640,1	3701,7	122,7	307,3	566,4	89,3
FMS (kN)		1339,9	1346,8	1351,7	1961,3	1969,7	1975,8	2825,4	2827,9	2831,0	3164,1
CSX (MPa)		10,796	10,968	11,189	15,780	16,009	16,220	22,552	22,828	23,103	25,284
TSX (MPa)		5,920	3,281	2,232	8,226	4,218	2,484	11,448	5,048	2,699	12,885
ENTHRU (kJ)		3,4	3,3	3,3	6,7	6,6	9,8	13,1	13,0	12,9	16,2
Res. Ativ. (kN)		600	1443	2027	600	1800	2278	600	1600	2600	600
Eficiência (%)		56	55	55	55	55	54	54	54	53	53

W (kN)		18,1 kN									
		0,5		1,0		1,5		2,0		2,5	
H (m)	Ru (kN)	600	1800	2600	600	1800	2600	600	1800	2600	600
SET (mm)		4,36	1,09	-0,20	7,82	2,70	0,82	13,36	5,24	2,31	15,75
Golpe/m		239,2	915,3	999,0	131,2	370,0	1216,5	74,8	191,0	432,0	63,5
FMS (kN)		1517,2	1526,6	1533,7	2190,7	2200,6	2209,7	3130,7	3140,6	3150,2	3506,5
CSX (MPa)		12,217	12,446	12,706	17,578	17,846	18,146	24,862	25,333	25,896	27,969
TSX (MPa)		5,983	2,247	1,305	8,565	2,997	1,381	12,572	3,707	1,768	14,280
ENTHRU (kJ)		5,4	5,3	5,1	10,6	10,4	10,3	20,7	20,5	20,3	25,8
Res. Ativ. (kN)		600	1577	2113	600	1800	2469	600	1600	2600	600
Eficiência (%)		60	59	56	59	57	56	57	57	56	56

W (kN)		24,1 kN									
		0,5		1,0		1,5		2,0		2,5	
H (m)	Ru (kN)	600	1800	2600	600	1800	2600	600	1800	2600	600
SET (mm)		6,04	1,67	0,09	10,99	3,86	1,28	18,75	7,26	3,37	21,95
Golpe/m		165,5	598,7	999,0	91,0	258,9	782,8	66,0	176,2	425,1	46,6
FMS (kN)		1636,1	1648,3	1660,2	2346,3	2360,5	2373,8	3342,6	3357,2	3372,2	3736,6
CSX (MPa)		13,151	13,413	13,699	18,813	19,110	19,438	26,700	27,099	27,478	29,891
TSX (MPa)		6,794	1,436	1,007	8,808	2,159	1,376	13,071	2,881	1,653	14,923
ENTHRU (kJ)		7,4	7,2	7,0	14,5	14,3	14,1	28,4	28,2	27,9	35,3
Res. Ativ. (kN)		600	1800	2215	600	1800	2600	600	1600	2600	600
Eficiência (%)		61	60	58	60	59	58	59	59	58	58

Estaca longa:  $\eta = 65\%$  e  $k = 1200 \text{ kN/mm}$ 

30.2 kN		0.5		1.0		1.5		2.0		2.5		3.0	
W (kN)	H (m)	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
SET (mm)		8.04	2.29	0.35	14.58	5.06	1.78	19.84	7.34	3.19	24.38	9.33	4.50
Golpe/m		124.4	430.4	2889.9	68.6	197.6	563.1	50.4	136.2	313.5	41.0	107.2	222.1
F <sub>MX</sub> (kN)		1726.3	1741.7	1760.5	2485.8	3029.4	3048.1	3029.4	3048.1	3072.3	3500.1	3524.9	3548.4
C <sub>50</sub> (MPa)		13.846	14.152	14.480	19.746	20.092	20.469	24.233	24.637	25.036	28.026	28.439	28.877
T <sub>50</sub> (MPa)		5.366	0.860	1.105	8.239	1.082	1.504	10.717	1.389	1.716	12.860	1.805	1.814
ENTHRU (kJ)		9.4	9.2	9.0	18.5	18.2	17.9	27.5	27.2	26.8	36.4	35.0	35.7
Res. Ativ. (kN)		600	1600	2304	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
Eficiência (%)		62	61	60	61	60	59	61	60	59	60	59	59

36.2 kN		0.5		1.0		1.5		2.0		2.5		3.0	
W (kN)	H (m)	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
SET (mm)		10.27	2.92	0.58	18.17	6.26	2.31	24.46	9.00	4.06	29.87	11.38	5.66
Golpe/m		97.4	342.2	1727.1	55.0	159.7	433.0	40.9	111.1	246.5	33.5	87.9	176.7
F <sub>MX</sub> (kN)		1794.6	1815.2	1841.0	2557.4	2579.1	2608.8	3135.9	3164.2	3195.4	3626.7	3655.9	3686.3
C <sub>50</sub> (MPa)		14.398	14.739	15.125	20.476	20.876	21.309	25.123	25.566	26.026	29.012	29.478	29.999
T <sub>50</sub> (MPa)		4.712	0.481	1.209	7.850	0.584	1.331	10.124	0.940	1.340	12.242	0.752	1.319
ENTHRU (kJ)		11.5	11.1	10.9	22.6	22.1	21.8	33.5	33.0	32.6	44.4	43.9	43.4
Res. Ativ. (kN)		600	1600	2385	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
Eficiência (%)		64	61	60	62	61	60	61	60	60	61	60	60

42.2 kN		0.5		1.0		1.5		2.0		2.5		3.0	
W (kN)	H (m)	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
SET (mm)		12.63	3.57	0.80	21.87	7.48	2.88	28.93	10.88	4.96	35.13	13.46	6.85
Golpe/m		79.8	280.1	1257.7	46.1	133.6	347.3	34.6	93.6	201.7	28.5	74.3	145.9
F <sub>MX</sub> (kN)		1850.4	1875.8	1909.7	2630.7	2660.4	2696.9	3228.1	3259.9	3299.1	3729.5	3762.5	3805.3
C <sub>50</sub> (MPa)		14.847	15.237	15.680	21.062	21.529	22.026	25.811	26.313	26.867	29.833	30.365	30.941
T <sub>50</sub> (MPa)		3.972	0.398	1.006	6.947	0.463	0.714	9.357	0.455	0.557	11.269	0.446	0.541
ENTHRU (kJ)		13.6	13.1	12.8	26.7	26.1	25.7	39.6	39.0	38.5	52.8	51.7	51.2
Res. Ativ. (kN)		600	1600	2460	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
Eficiência (%)		64	62	61	63	62	61	63	62	61	62	61	61

48.3 kN		0.5		1.0		1.5		2.0		2.5		3.0	
W (kN)	H (m)	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
SET (mm)		14.75	4.25	1.00	25.03	8.75	3.49	33.15	12.41	5.91	40.09	15.58	8.10
Golpe/m		67.8	235.3	1001.3	40.0	114.3	286.7	30.2	80.6	189.2	24.9	64.2	123.5
F <sub>MX</sub> (kN)		1898.2	1929.6	1970.9	2695.6	2730.6	2774.0	3301.7	3340.9	3389.7	3815.8	3858.0	3907.5
C <sub>50</sub> (MPa)		15.225	15.670	16.179	21.579	22.086	22.647	26.446	26.967	27.599	30.527	31.119	31.766
T <sub>50</sub> (MPa)		3.312	0.387	0.831	6.190	0.511	0.538	8.433	0.704	0.539	10.262	0.801	0.493
ENTHRU (kJ)		15.7	15.1	14.7	30.8	30.1	29.6	46.8	46.0	44.4	60.6	59.9	59.2
Res. Ativ. (kN)		600	1600	2530	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
Eficiência (%)		65	63	61	64	62	61	63	62	61	62	61	61

Estaca longa:  $\eta = 65\%$  e  $k = 1200 \text{ kN/mm}$

W (kN)	54,3 kN																			
	H (m)			0,5			1,0			1,5			2,0			2,5			3,0	
Ru (kN)		600	1600	2600		600	1600	2600		600	1600	2600		600	1600	2600		600	1600	2600
SET (mm)		16,79	4,94	1,19	28,07	10,01	4,11	37,00	14,13	6,88	44,81	17,70	9,36	52,40	20,88	11,62	59,41	23,79	13,71	
Golpe/m		59,6	202,5	841,9	35,6	99,9	243,0	27,0	70,7	146,4	22,3	55,5	106,9	19,1	47,9	86,1	16,8	42,0	72,9	
FMX (kN)		1936,3	1976,4	2024,5	2748,5	2789,6	2841,2	3368,9	3413,2	3465,3	3890,1	3938,4	3986,6	4347,8	4399,7	4461,9	4781,2	4816,5	4882,6	
CSX (MPa)		15,560	16,035	16,599	22,018	22,569	23,177	26,940	27,567	28,227	31,114	31,751	32,476	34,778	35,461	36,216	38,083	38,802	39,606	
TSX (MPa)		2,734	0,389	0,719	5,393	0,771	0,508	7,524	0,894	0,489	9,290	0,867	0,504	10,848	0,790	0,503	12,355	0,736	0,506	
ENTHRU (kJ)		18,0	17,1	16,7	35,0	34,3	33,5	51,8	51,3	50,3	68,6	68,2	67,0	85,3	85,0	83,7	101,9	101,8	100,3	
Res. Ativ. (kN)		600	1600	2596	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	
Eficiência (%)		66	63	62	64	63	62	64	63	62	63	63	62	63	63	62	63	62	62	

W (kN)	60,3 kN																				
	H (m)			0,5			1,0			1,5			2,0			2,5			3,0		
Ru (kN)	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600
SET (mm)	18,78	5,42	1,28	30,96	11,14	4,54	41,46	15,86	7,68	49,04	19,92	10,53	57,27	23,52	13,14	64,87	26,79	15,57			
Golpe/m	53,2	184,4	780,6	32,3	89,8	220,2	24,1	63,1	130,3	20,4	50,2	95,0	17,5	42,5	76,1	15,4	37,3	64,2			
FMX (kN)	1955,3	1959,7	1963,7	2774,4	2780,7	2785,9	3402,6	3408,4	3414,5	3830,7	3935,8	3942,7	4395,1	4400,3	4408,4	4814,6	4821,4	4829,9			
CSX (MPa)	15,696	16,358	16,037	22,231	22,423	22,622	27,222	27,433	27,663	31,420	31,876	31,900	35,127	35,402	35,653	38,482	38,764	39,041			
TSX (MPa)	1,041	1,341	0,982	3,393	1,840	1,617	5,298	1,773	1,764	6,906	2,061	2,061	8,366	1,623	2,389	9,712	1,475	2,609			
ENTHRU (kJ)	20,2	19,5	18,8	39,7	38,7	37,7	59,0	57,7	56,6	77,7	75,4	75,4	95,5	95,6	94,1	113,3	114,4	112,8			
Res. Ativ. (kN)	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600	600	1600	2600			
Eficiência (%)	67	65	62	66	64	63	65	64	63	64	63	63	63	63	62	63	63	62			

## **APÊNDICE C**

### **VALIDAÇÃO PARA AS ESTACAS MODELO**



## Estaca Curta

 $\eta = 30\%$  et = 10 cm

W (kN) 20,0				
K (kN/mm)	745			
H (m)	1,2	1,8	2,4	3,0
SET (mm)	0,00	0,46	0,89	1,29
Golpe/m	9999,0	2156,3	1117,8	773,8
FMX (kN)	2119,2	2614,5	3030,6	3394,8
CSX (MPa)	7,746	9,573	11,102	12,469
TSX (MPa)	1,339	1,713	2,036	2,298
ENTHRU (kJ)	4,5	6,7	8,8	10,9
Res. Ativ. (kN)	1919	2000	2000	2000
Eficiência (%)	19	19	18	18

 $\eta = 65\%$  et = 10 cm

W (kN) 20,0				
K (kN/mm)	745			
H (m)	1,2	1,8	2,4	3,0
SET (mm)	1,03	1,83	2,53	3,17
Golpe/m	969,9	546,5	394,9	315,6
FMX (kN)	3156,9	3874,7	4485,8	5023,2
CSX (MPa)	11,567	14,276	16,568	18,564
TSX (MPa)	2,130	2,687	3,100	3,418
ENTHRU (kJ)	9,5	14,0	18,5	23,0
Res. Ativ. (kN)	2000	2000	2000	2000
Eficiência (%)	40	39	39	38

W (kN) 30,0				
K (kN/mm)	745			
H (m)	1,2	1,8	2,4	3,0
SET (mm)	0,64	1,41	2,09	2,69
Golpe/m	1660,5	709,3	479,5	371,5
FMX (kN)	2480,6	3052,3	3532,1	3953,9
CSX (MPa)	9,153	11,297	13,096	14,684
TSX (MPa)	0,586	0,589	0,588	0,610
ENTHRU (kJ)	7,5	11,0	14,5	18,0
Res. Ativ. (kN)	2000	2000	2000	2000
Eficiência (%)	21	20	20	20

W (kN) 30,0				
K (kN/mm)	745			
H (m)	1,2	1,8	2,4	3,0
SET (mm)	2,29	3,50	4,53	5,46
Golpe/m	435,8	285,3	220,6	183,6
FMX (kN)	3678,1	4516,3	5225,9	5851,1
CSX (MPa)	13,651	16,727	19,288	21,543
TSX (MPa)	0,594	0,708	0,903	1,180
ENTHRU (kJ)	15,7	23,1	30,5	37,8
Res. Ativ. (kN)	2000	2000	2000	2000
Eficiência (%)	44	43	42	42

W (kN) 40,0				
K (kN/mm)	745			
H (m)	1,2	1,8	2,4	3,0
SET (mm)	1,38	2,44	3,35	4,16
Golpe/m	722,1	409,5	298,2	240,3
FMX (kN)	2762,6	3394,3	3929,6	4401,7
CSX (MPa)	10,270	12,623	14,552	16,247
TSX (MPa)	0,461	0,424	0,601	0,712
ENTHRU (kJ)	10,7	15,7	20,7	25,7
Res. Ativ. (kN)	2000	2000	2000	2000
Eficiência (%)	22	22	22	21

W (kN) 40,0				
K (kN/mm)	745			
H (m)	1,2	1,8	2,4	3,0
SET (mm)	3,63	5,24	6,60	7,80
Golpe/m	275,3	190,9	151,5	128,2
FMX (kN)	4092,9	5028,3	5816,2	6509,4
CSX (MPa)	15,139	18,506	21,367	23,888
TSX (MPa)	0,638	1,001	1,431	1,946
ENTHRU (kJ)	22,4	33,0	43,6	54,0
Res. Ativ. (kN)	2000	2000	2000	2000
Eficiência (%)	47	46	46	46

W (kN) 50,0				
K (kN/mm)	745			
H (m)	1,2	1,8	2,4	3,0
SET (mm)	2,18	3,49	4,60	5,58
Golpe/m	468,3	286,6	217,5	179,3
FMX (kN)	3001,2	3690,1	4270,7	4780,7
CSX (MPa)	11,152	13,619	15,719	17,570
TSX (MPa)	0,515	0,688	0,799	0,873
ENTHRU (kJ)	13,9	20,4	26,9	33,3
Res. Ativ. (kN)	2000	2000	2000	2000
Eficiência (%)	23	23	22	22

W (kN) 50,0				
K (kN/mm)	745			
H (m)	1,2	1,8	2,4	3,0
SET (mm)	4,94	5,89	8,55	10,02
Golpe/m	202,5	146,2	117,0	99,8
FMX (kN)	4447,0	5457,4	6309,6	7059,6
CSX (MPa)	16,359	20,026	23,115	25,829
TSX (MPa)	0,825	0,926	0,989	1,053
ENTHRU (kJ)	29,0	42,9	56,6	70,4
Res. Ativ. (kN)	2000	2000	2000	2000
Eficiência (%)	48	48	47	47

W (kN) 60,0				
K (kN/mm)	745			
H (m)	1,2	1,8	2,4	3,0
SET (mm)	2,92	4,43	5,71	6,84
Golpe/m	342,7	225,8	175,2	146,2
FMX (kN)	3217,7	3952,7	4571,8	5115,7
CSX (MPa)	11,836	14,487	16,734	18,704
TSX (MPa)	0,606	0,727	0,781	0,754
ENTHRU (kJ)	16,9	24,9	32,8	40,8
Res. Ativ. (kN)	2000	2000	2000	2000
Eficiência (%)	23	23	23	23

W (kN) 60,0				
K (kN/mm)	745			
H (m)	1,2	1,8	2,4	3,0
SET (mm)	6,10	8,36	10,29	12,02
Golpe/m	164,0	119,7	97,2	83,2
FMX (kN)	4760,0	5835,7	6741,8	7539,9
CSX (MPa)	17,416	21,311	24,586	27,467
TSX (MPa)	0,778	0,866	0,936	0,912
ENTHRU (kJ)	35,5	52,7	69,9	87,0
Res. Ativ. (kN)	2000	2000	2000	2000
Eficiência (%)	49	49	49	48

## Estaca Média

 $\eta = 30\%$  e  $t = 10$  cm

W (kN) 18,0				
K (kN/mm)	518			
H (m)	1,0	1,5	2,0	2,5
SET (mm)	-0,30	0,25	0,74	1,18
Golpe/m	9999,0	4068,7	1355,8	848,4
FMX (kN)	1481,0	1826,3	2115,2	2368,0
CSX (MPa)	7,791	9,610	11,140	12,503
TSX (MPa)	3,056	3,618	4,109	4,505
ENTHRU (kJ)	3,6	5,4	7,1	8,8
Res. Ativ. (kN)	1571	1630	1683	1731
Eficiência (%)	20	20	20	20

W (kN) 27,0				
K (kN/mm)	518			
H (m)	1,0	1,5	2,0	2,5
SET (mm)	0,37	1,20	1,90	2,55
Golpe/m	2720,0	834,9	525,8	392,0
FMX (kN)	1723,5	2119,4	2452,4	2745,4
CSX (MPa)	9,139	11,246	12,991	14,503
TSX (MPa)	1,835	2,280	2,681	3,006
ENTHRU (kJ)	5,8	8,6	11,5	14,2
Res. Ativ. (kN)	1643	1733	1800	1800
Eficiência (%)	21	21	21	21

W (kN) 36,0				
K (kN/mm)	518			
H (m)	1,0	1,5	2,0	2,5
SET (mm)	1,05	2,12	3,09	3,99
Golpe/m	954,0	472,3	323,3	250,9
FMX (kN)	1912,5	2349,5	2717,0	3040,2
CSX (MPa)	10,165	12,418	14,326	16,006
TSX (MPa)	0,746	0,884	1,030	1,163
ENTHRU (kJ)	8,1	12,0	16,0	19,9
Res. Ativ. (kN)	1717	1800	1800	1800
Eficiência (%)	23	22	22	22

W (kN) 45,0				
K (kN/mm)	518			
H (m)	1,0	1,5	2,0	2,5
SET (mm)	1,71	3,09	4,33	5,46
Golpe/m	584,1	323,6	230,8	183,3
FMX (kN)	2074,5	2544,4	2941,0	3289,3
CSX (MPa)	10,974	13,416	15,468	17,272
TSX (MPa)	0,468	0,538	0,698	0,883
ENTHRU (kJ)	10,4	15,5	20,6	25,7
Res. Ativ. (kN)	1788	1800	1800	1800
Eficiência (%)	23	23	23	23

W (kN) 54,0				
K (kN/mm)	518			
H (m)	1,0	1,5	2,0	2,5
SET (mm)	2,40	4,10	5,61	6,95
Golpe/m	417,1	243,7	178,4	143,9
FMX (kN)	2217,8	2716,5	3134,9	3503,7
CSX (MPa)	11,702	14,286	16,465	18,364
TSX (MPa)	0,476	0,537	0,728	0,974
ENTHRU (kJ)	13,0	19,4	25,8	32,1
Res. Ativ. (kN)	1800	1800	1800	1800
Eficiência (%)	24	24	24	24

 $\eta = 65\%$  e  $t = 10$  cm

W (kN) 18,0				
K (kN/mm)	518			
H (m)	1,0	1,5	2,0	2,5
SET (mm)	0,89	1,76	2,51	3,21
Golpe/m	1123,9	567,2	397,8	312,0
FMX (kN)	2202,8	2704,7	3129,6	3503,4
CSX (MPa)	11,611	14,311	16,514	18,466
TSX (MPa)	4,247	5,000	5,568	6,074
ENTHRU (kJ)	7,7	11,3	15,0	18,6
Res. Ativ. (kN)	1700	1794	1800	1800
Eficiência (%)	43	42	42	41

W (kN) 27,0				
K (kN/mm)	518			
H (m)	1,0	1,5	2,0	2,5
SET (mm)	2,12	3,46	4,62	5,65
Golpe/m	471,1	289,6	216,7	176,9
FMX (kN)	2553,8	3133,8	3624,2	4056,1
CSX (MPa)	13,514	16,512	19,048	21,279
TSX (MPa)	2,791	3,427	3,891	4,246
ENTHRU (kJ)	12,4	18,4	24,3	30,2
Res. Ativ. (kN)	1800	1800	1800	1800
Eficiência (%)	46	46	46	46

W (kN) 36,0				
K (kN/mm)	518			
H (m)	1,0	1,5	2,0	2,5
SET (mm)	3,40	5,20	6,75	8,12
Golpe/m	294,2	192,4	148,2	123,1
FMX (kN)	2828,9	3470,3	4010,3	4485,2
CSX (MPa)	14,907	18,230	21,033	23,502
TSX (MPa)	1,077	1,329	1,918	2,552
ENTHRU (kJ)	17,3	25,7	34,1	42,4
Res. Ativ. (kN)	1800	1800	1800	1800
Eficiência (%)	48	48	47	47

W (kN) 45,0				
K (kN/mm)	518			
H (m)	1,0	1,5	2,0	2,5
SET (mm)	4,72	6,97	8,89	10,59
Golpe/m	211,9	143,5	112,5	94,4
FMX (kN)	3061,5	3750,4	4329,5	4840,2
CSX (MPa)	16,094	19,664	22,668	25,310
TSX (MPa)	0,760	1,134	1,610	2,078
ENTHRU (kJ)	22,3	33,3	44,1	54,9
Res. Ativ. (kN)	1800	1800	1800	1800
Eficiência (%)	50	49	49	49

W (kN) 54,0				
K (kN/mm)	518			
H (m)	1,0	1,5	2,0	2,5
SET (mm)	6,07	8,76	11,05	13,08
Golpe/m	164,7	114,2	90,5	76,5
FMX (kN)	3262,4	3992,3	4605,2	5144,5
CSX (MPa)	17,115	20,899	24,080	26,874
TSX (MPa)	0,813	1,414	2,058	2,599
ENTHRU (kJ)	27,9	41,5	55,0	68,4
Res. Ativ. (kN)	1800	1800	1800	1800
Eficiência (%)	52	51	51	51

## Estaca Longa

 $\eta = 30\%$  e  $t = 10$  cm

W (kN)		16,0			
K (kN/mm)		331			
H (m)		0,8	1,2	1,6	2,0
SET (mm)		0,0	0,6	1,2	1,6
Golpe/m		9999,0	1567,9	865,2	609,2
FMX (kN)		965,4	1185,6	1370,4	1532,1
CSX (MPa)		7,933	9,701	11,184	12,488
TSX (MPa)		1,208	1,322	1,580	1,779
ENTHRU (kJ)		2,7	4,1	5,4	6,8
Res. Ativ. (kN)		1345	1480	1591	1600
Eficiência (%)		21	21	21	21

 $\eta = 65\%$  e  $t = 10$  cm

W (kN)		16,0			
K (kN/mm)		331			
H (m)		0,8	1,2	1,6	2,0
SET (mm)		1,31	2,35	3,30	4,16
Golpe/m		761,6	425,0	303,0	240,4
FMX (kN)		1426,4	1747,9	2018,3	2255,6
CSX (MPa)		11,637	14,206	16,373	18,279
TSX (MPa)		1,651	2,026	2,315	2,533
ENTHRU (kJ)		5,9	8,8	11,6	14,4
Res. Ativ. (kN)		1600	1600	1600	1600
Eficiência (%)		46	46	46	46

W (kN)		24,0			
K (kN/mm)		331			
H (m)		0,8	1,2	1,6	2,0
SET (mm)		0,61	1,44	2,28	3,08
Golpe/m		1647,4	693,6	439,2	325,1
FMX (kN)		1121,0	1370,1	1578,8	1763,2
CSX (MPa)		9,180	11,172	12,851	14,321
TSX (MPa)		0,682	0,572	0,617	0,730
ENTHRU (kJ)		4,4	6,6	8,8	10,9
Res. Ativ. (kN)		1474	1600	1600	1600
Eficiência (%)		23	23	23	23

W (kN)		24,0			
K (kN/mm)		331			
H (m)		0,8	1,2	1,6	2,0
SET (mm)		2,55	4,18	5,62	6,90
Golpe/m		392,2	239,2	178,1	144,8
FMX (kN)		1642,7	2007,1	2312,8	2582,8
CSX (MPa)		13,360	16,278	18,736	20,894
TSX (MPa)		0,629	0,926	1,158	1,331
ENTHRU (kJ)		9,5	14,2	18,8	23,4
Res. Ativ. (kN)		1600	1600	1600	1600
Eficiência (%)		49	49	49	49

W (kN)		32,0			
K (kN/mm)		331			
H (m)		0,8	1,2	1,6	2,0
SET (mm)		1,13	2,33	3,50	4,59
Golpe/m		881,1	428,9	285,4	218,0
FMX (kN)		1240,0	1510,0	1736,7	1936,7
CSX (MPa)		10,127	12,290	14,113	15,711
TSX (MPa)		0,517	0,562	0,657	0,731
ENTHRU (kJ)		6,1	9,2	12,3	15,3
Res. Ativ. (kN)		1586	1600	1600	1600
Eficiência (%)		24	24	24	24

W (kN)		32,0			
K (kN/mm)		331			
H (m)		0,8	1,2	1,6	2,0
SET (mm)		3,87	6,07	7,98	9,69
Golpe/m		258,1	164,8	125,3	103,1
FMX (kN)		1805,8	2201,7	2534,0	2827,6
CSX (MPa)		14,666	17,834	20,502	22,847
TSX (MPa)		0,685	0,799	0,903	1,118
ENTHRU (kJ)		13,3	19,8	26,3	32,8
Res. Ativ. (kN)		1600	1600	1600	1600
Eficiência (%)		52	52	51	51

W (kN)		40,0			
K (kN/mm)		331			
H (m)		0,8	1,2	1,6	2,0
SET (mm)		1,68	3,29	4,78	6,14
Golpe/m		594,3	303,8	209,2	162,8
FMX (kN)		1337,3	1623,5	1864,3	2076,7
CSX (MPa)		10,903	13,196	15,127	16,826
TSX (MPa)		0,384	0,474	0,524	0,539
ENTHRU (kJ)		7,9	11,9	15,8	19,8
Res. Ativ. (kN)		1600	1600	1600	1600
Eficiência (%)		25	25	25	25

W (kN)		40,0			
K (kN/mm)		331			
H (m)		0,8	1,2	1,6	2,0
SET (mm)		5,25	8,00	10,38	12,51
Golpe/m		190,6	125,0	96,3	79,9
FMX (kN)		1937,8	2357,5	2711,6	3023,3
CSX (MPa)		15,714	19,083	21,913	24,411
TSX (MPa)		0,633	0,519	0,527	0,710
ENTHRU (kJ)		17,2	25,7	34,1	42,5
Res. Ativ. (kN)		1600	1600	1600	1600
Eficiência (%)		54	54	53	53

W (kN)		48,0			
K (kN/mm)		331			
H (m)		0,8	1,2	1,6	2,0
SET (mm)		2,31	4,29	6,10	7,73
Golpe/m		433,4	232,9	164,0	129,3
FMX (kN)		1420,5	1719,7	1972,1	2194,1
CSX (MPa)		11,567	13,966	15,987	17,768
TSX (MPa)		0,361	0,391	0,402	0,641
ENTHRU (kJ)		9,7	14,6	19,5	24,4
Res. Ativ. (kN)		1600	1600	1600	1600
Eficiência (%)		25	25	25	25

W (kN)		48,0			
K (kN/mm)		331			
H (m)		0,8	1,2	1,6	2,0
SET (mm)		6,66	9,96	12,81	15,36
Golpe/m		150,2	100,4	78,1	65,1
FMX (kN)		2049,0	2489,3	2859,5	3186,5
CSX (MPa)		16,604	20,129	23,101	25,714
TSX (MPa)		0,481	0,909	1,117	1,198
ENTHRU (kJ)		21,2	31,7	42,2	52,6
Res. Ativ. (kN)		1600	1600	1600	1600
Eficiência (%)		55	55	55	55

## Estaca Curta

 $\eta = 30\%$  e  $k = 500$  kN/mm

W (kN) 20,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	1,2	1,8	2,4	3,0
SET (mm)	-0,12	0,33	0,75	1,14
Golpe/m	9999,0	3027,5	1337,1	876,6
FMX (kN)	1864,6	2293,9	2655,6	2974,0
CSX (MPa)	6,857	8,468	9,805	10,994
TSX (MPa)	0,843	0,865	0,896	0,965
ENTHRU (kJ)	4,0	5,9	7,7	9,6
Res. Ativ. (kN)	1888	2000	2000	2000
Eficiência (%)	17	16	16	16

 $\eta = 66\%$  e  $k = 500$  kN/mm

W (kN) 20,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	1,2	1,8	2,4	3,0
SET (mm)	0,88	1,68	2,39	3,04
Golpe/m	1133,5	594,4	417,8	329,3
FMX (kN)	2765,9	3395,3	3924,4	4391,1
CSX (MPa)	10,216	12,587	14,579	16,277
TSX (MPa)	0,919	1,054	1,249	1,412
ENTHRU (kJ)	8,4	12,3	16,3	20,3
Res. Ativ. (kN)	2000	2000	2000	2000
Eficiência (%)	35	34	34	34

W (kN) 30,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	1,2	1,8	2,4	3,0
SET (mm)	0,49	1,25	1,93	2,54
Golpe/m	2035,6	800,0	518,0	393,4
FMX (kN)	2205,4	2709,8	3135,0	3509,9
CSX (MPa)	8,182	10,083	11,664	13,016
TSX (MPa)	0,502	0,592	0,686	0,800
ENTHRU (kJ)	6,8	9,9	13,1	16,2
Res. Ativ. (kN)	2000	2000	2000	2000
Eficiência (%)	19	18	18	18

W (kN) 30,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	1,2	1,8	2,4	3,0
SET (mm)	2,14	3,37	4,43	5,38
Golpe/m	467,0	297,0	225,9	185,7
FMX (kN)	3264,7	4007,7	4635,0	5188,3
CSX (MPa)	12,132	14,706	17,070	19,078
TSX (MPa)	0,730	0,988	1,446	1,859
ENTHRU (kJ)	14,1	20,8	27,4	34,1
Res. Ativ. (kN)	2000	2000	2000	2000
Eficiência (%)	39	39	38	38

W (kN) 40,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	1,2	1,8	2,4	3,0
SET (mm)	1,24	2,28	3,19	4,00
Golpe/m	809,5	438,0	313,7	250,0
FMX (kN)	2482,3	3049,3	3528,7	3950,4
CSX (MPa)	9,199	11,264	12,976	14,499
TSX (MPa)	0,404	0,484	0,607	0,695
ENTHRU (kJ)	9,6	14,1	18,6	23,0
Res. Ativ. (kN)	2000	2000	2000	2000
Eficiência (%)	20	20	19	19

W (kN) 40,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	1,2	1,8	2,4	3,0
SET (mm)	3,47	5,10	6,50	7,75
Golpe/m	288,4	196,2	153,9	129,1
FMX (kN)	3674,7	4509,8	5211,9	5829,0
CSX (MPa)	13,501	16,527	19,067	21,299
TSX (MPa)	0,641	0,849	1,097	1,273
ENTHRU (kJ)	20,1	29,7	39,2	48,8
Res. Ativ. (kN)	2000	2000	2000	2000
Eficiência (%)	42	41	41	41

W (kN) 50,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	1,2	1,8	2,4	3,0
SET (mm)	1,97	3,25	4,34	5,31
Golpe/m	506,5	307,7	230,4	188,2
FMX (kN)	2723,1	3344,1	3866,8	4326,4
CSX (MPa)	9,945	12,147	14,027	15,676
TSX (MPa)	0,561	0,637	0,697	0,735
ENTHRU (kJ)	12,4	18,2	24,0	29,7
Res. Ativ. (kN)	2000	2000	2000	2000
Eficiência (%)	21	20	20	20

W (kN) 50,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	1,2	1,8	2,4	3,0
SET (mm)	4,67	6,64	8,33	9,84
Golpe/m	214,0	150,6	120,0	101,6
FMX (kN)	4026,0	4934,9	5698,0	6371,0
CSX (MPa)	14,599	17,868	20,598	23,012
TSX (MPa)	0,713	0,770	0,756	0,776
ENTHRU (kJ)	25,8	38,3	51,0	63,6
Res. Ativ. (kN)	2000	2000	2000	2000
Eficiência (%)	43	43	43	42

W (kN) 60,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	1,2	1,8	2,4	3,0
SET (mm)	2,68	4,19	5,49	6,66
Golpe/m	372,5	238,5	182,1	150,1
FMX (kN)	2932,0	3597,8	4158,2	4650,1
CSX (MPa)	10,499	12,857	14,846	16,589
TSX (MPa)	0,533	0,547	0,541	0,536
ENTHRU (kJ)	15,2	22,4	29,7	37,0
Res. Ativ. (kN)	2000	2000	2000	2000
Eficiência (%)	21	21	21	21

W (kN) 60,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	1,2	1,8	2,4	3,0
SET (mm)	5,89	8,25	10,28	12,06
Golpe/m	169,6	121,2	97,3	82,9
FMX (kN)	4328,4	5301,5	6118,7	6836,5
CSX (MPa)	15,449	18,900	21,806	24,368
TSX (MPa)	0,538	0,536	0,536	0,585
ENTHRU (kJ)	32,1	47,8	63,5	79,2
Res. Ativ. (kN)	2000	2000	2000	2000
Eficiência (%)	45	44	44	44

## Estaca Média

 $\eta = 30 \% \text{ e } k = 500 \text{ kN/mm}$ 

W (kN) 18,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	1,0	1,5	2,0	2,5
SET (mm)	-0,31	0,23	0,72	1,16
Golpe/m	9999,0	4309,4	1385,3	860,0
FMX (kN)	1467,1	1806,5	2092,8	2344,4
CSX (MPa)	7,709	9,518	11,035	12,371
TSX (MPa)	3,005	3,550	4,022	4,425
ENTHRU (kJ)	3,6	5,3	7,0	8,7
Res. Ativ. (kN)	1570	1629	1681	1729
Eficiência (%)	20	20	19	19

 $\eta = 65 \% \text{ e } k = 500 \text{ kN/mm}$ 

W (kN) 18,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	1,0	1,5	2,0	2,5
SET (mm)	0,87	1,75	2,50	3,19
Golpe/m	1144,8	572,3	399,6	313,1
FMX (kN)	2179,9	2676,9	3094,0	3463,9
CSX (MPa)	11,497	14,159	16,359	18,260
TSX (MPa)	4,162	4,920	5,473	5,972
ENTHRU (kJ)	7,6	11,2	14,8	18,4
Res. Ativ. (kN)	1698	1792	1800	1800
Eficiência (%)	42	41	41	41

W (kN) 27,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	1,0	1,5	2,0	2,5
SET (mm)	0,35	1,18	1,89	2,54
Golpe/m	2839,6	845,4	530,3	394,2
FMX (kN)	1708,4	2098,8	2429,1	2719,9
CSX (MPa)	9,062	11,150	12,865	14,365
TSX (MPa)	1,781	2,187	2,585	2,892
ENTHRU (kJ)	5,8	8,6	11,3	14,1
Res. Ativ. (kN)	1641	1731	1800	1800
Eficiência (%)	21	21	21	21

W (kN) 27,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	1,0	1,5	2,0	2,5
SET (mm)	2,10	3,44	4,60	5,64
Golpe/m	475,1	290,9	217,4	177,3
FMX (kN)	2529,7	3105,9	3590,7	4016,8
CSX (MPa)	13,384	16,358	18,875	21,092
TSX (MPa)	2,694	3,309	3,768	4,123
ENTHRU (kJ)	12,3	18,2	24,1	29,9
Res. Ativ. (kN)	1800	1800	1800	1800
Eficiência (%)	46	46	46	44

W (kN) 36,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	1,0	1,5	2,0	2,5
SET (mm)	1,03	2,10	3,07	3,97
Golpe/m	969,1	476,3	325,3	251,9
FMX (kN)	1896,9	2329,7	2694,7	3015,6
CSX (MPa)	10,083	12,312	14,203	15,872
TSX (MPa)	0,710	0,836	0,968	1,096
ENTHRU (kJ)	8,0	11,9	15,8	19,7
Res. Ativ. (kN)	1715	1800	1800	1800
Eficiência (%)	22	22	22	22

W (kN) 36,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	1,0	1,5	2,0	2,5
SET (mm)	3,38	5,18	6,73	8,11
Golpe/m	295,7	193,0	148,6	123,3
FMX (kN)	2805,8	3440,7	3974,5	4445,5
CSX (MPa)	14,782	18,082	20,851	23,286
TSX (MPa)	1,014	1,269	1,534	1,769
ENTHRU (kJ)	17,1	25,5	33,8	42,0
Res. Ativ. (kN)	1800	1800	1800	1800
Eficiência (%)	48	47	47	47

W (kN) 45,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	1,0	1,5	2,0	2,5
SET (mm)	1,69	3,07	4,31	5,44
Golpe/m	590,0	325,8	231,8	183,9
FMX (kN)	2059,0	2526,3	2918,5	3263,3
CSX (MPa)	10,894	13,317	15,351	17,136
TSX (MPa)	0,473	0,545	0,714	0,902
ENTHRU (kJ)	10,3	15,4	20,5	25,5
Res. Ativ. (kN)	1786	1800	1800	1800
Eficiência (%)	23	23	23	23

W (kN) 45,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	1,0	1,5	2,0	2,5
SET (mm)	4,70	6,95	8,87	10,58
Golpe/m	212,8	143,9	112,7	94,5
FMX (kN)	3037,8	3721,6	4296,7	4802,1
CSX (MPa)	15,968	19,509	22,493	25,114
TSX (MPa)	0,778	1,161	1,673	2,143
ENTHRU (kJ)	22,1	33,0	43,8	54,4
Res. Ativ. (kN)	1800	1800	1800	1800
Eficiência (%)	49	49	49	48

W (kN) 54,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	1,0	1,5	2,0	2,5
SET (mm)	2,38	4,08	5,59	6,93
Golpe/m	420,9	244,9	179,0	144,2
FMX (kN)	2203,7	2697,7	3114,1	3479,5
CSX (MPa)	11,626	14,185	16,342	18,238
TSX (MPa)	0,476	0,535	0,715	0,954
ENTHRU (kJ)	12,9	19,3	25,6	31,8
Res. Ativ. (kN)	1800	1800	1800	1800
Eficiência (%)	24	24	24	24

W (kN) 54,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	1,0	1,5	2,0	2,5
SET (mm)	6,05	8,74	11,03	13,06
Golpe/m	165,3	114,4	90,6	76,5
FMX (kN)	3240,5	3963,1	4572,4	5108,1
CSX (MPa)	16,998	20,746	23,902	26,678
TSX (MPa)	0,799	1,395	2,044	2,583
ENTHRU (kJ)	27,7	41,2	54,6	67,9
Res. Ativ. (kN)	1800	1800	1800	1800
Eficiência (%)	51	51	51	50

## Estaca Longa

 $\eta = 30\%$  e  $k = 500$  kN/mm

W (kN) 16,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0
SET (mm)	0,2	0,8	1,4	1,9
Golpe/m	4914,3	1193,8	737,1	536,7
FMX (kN)	1065,6	1313,2	1522,0	1704,5
CSX (MPa)	8,742	10,732	12,396	13,853
TSX (MPa)	1,549	1,831	2,121	2,342
ENTHRU (kJ)	3,0	4,5	6,0	7,4
Res. Ativ. (kN)	1387	1523	1600	1600
Eficiência (%)	23	23	23	23

 $\eta = 65\%$  e  $k = 500$  kN/mm

W (kN) 16,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0
SET (mm)	1,53	2,68	3,52	4,36
Golpe/m	655,1	387,6	284,2	229,2
FMX (kN)	1585,4	1945,2	2250,0	2517,5
CSX (MPa)	12,893	15,793	18,221	20,346
TSX (MPa)	2,200	2,603	2,897	3,104
ENTHRU (kJ)	6,4	9,6	12,7	15,7
Res. Ativ. (kN)	1600	1600	1600	1600
Eficiência (%)	50	50	50	49

W (kN) 24,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0
SET (mm)	0,82	1,68	2,53	3,32
Golpe/m	1220,8	595,5	395,7	301,2
FMX (kN)	1221,6	1498,4	1731,0	1934,2
CSX (MPa)	9,988	12,211	14,070	15,711
TSX (MPa)	1,019	0,912	1,058	1,254
ENTHRU (kJ)	48	7,2	9,5	11,8
Res. Ativ. (kN)	1519	1600	1600	1600
Eficiência (%)	25	25	25	25

W (kN) 24,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0
SET (mm)	2,80	4,41	5,82	7,09
Golpe/m	357,4	226,7	171,8	141,0
FMX (kN)	1801,4	2205,8	2546,3	2845,0
CSX (MPa)	14,638	17,877	20,597	23,001
TSX (MPa)	1,131	1,499	1,729	1,902
ENTHRU (kJ)	10,3	15,3	20,3	25,2
Res. Ativ. (kN)	1600	1600	1600	1600
Eficiência (%)	54	53	53	53

W (kN) 32,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0
SET (mm)	1,36	2,60	3,76	4,83
Golpe/m	736,0	384,4	265,8	207,0
FMX (kN)	1336,8	1634,0	1884,3	2104,1
CSX (MPa)	10,914	13,295	15,294	17,056
TSX (MPa)	0,526	0,512	0,595	0,678
ENTHRU (kJ)	6,6	9,9	13,2	16,4
Res. Ativ. (kN)	1600	1600	1600	1600
Eficiência (%)	26	26	26	26

W (kN) 32,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0
SET (mm)	4,13	6,29	8,18	9,87
Golpe/m	242,2	158,9	122,3	101,3
FMX (kN)	1960,4	2394,8	2761,8	3084,4
CSX (MPa)	15,901	19,392	22,322	24,900
TSX (MPa)	0,240	0,777	0,866	0,964
ENTHRU (kJ)	14,2	21,2	28,2	35,1
Res. Ativ. (kN)	1600	1600	1600	1600
Eficiência (%)	55	55	55	55

W (kN) 40,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0
SET (mm)	0,92	2,29	3,76	5,14
Golpe/m	1088,5	437,3	266,3	194,6
FMX (kN)	1170,2	1409,4	1610,9	1788,0
CSX (MPa)	9,547	11,465	13,080	14,499
TSX (MPa)	0,334	0,438	0,590	0,690
ENTHRU (kJ)	6,4	9,8	13,2	16,6
Res. Ativ. (kN)	1540	1600	1600	1600
Eficiência (%)	20	20	21	21

W (kN) 40,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0
SET (mm)	4,23	7,04	9,49	11,68
Golpe/m	236,6	142,1	105,3	85,6
FMX (kN)	1672,3	2023,4	2319,0	2579,7
CSX (MPa)	13,572	16,385	18,753	20,842
TSX (MPa)	0,625	0,811	1,010	1,147
ENTHRU (kJ)	14,4	21,7	29,1	36,4
Res. Ativ. (kN)	1600	1600	1600	1600
Eficiência (%)	45	45	45	45

W (kN) 48,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0
SET (mm)	2,61	4,58	6,35	7,97
Golpe/m	383,6	218,4	157,4	125,5
FMX (kN)	1506,3	1831,7	2106,1	2347,2
CSX (MPa)	12,264	14,873	17,067	19,004
TSX (MPa)	0,367	0,413	0,428	0,554
ENTHRU (kJ)	10,4	15,5	20,7	25,8
Res. Ativ. (kN)	1600	1600	1600	1600
Eficiência (%)	27	27	27	27

W (kN) 48,0				
K (kN/mm)	500			
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0
SET (mm)	6,91	10,16	12,98	15,50
Golpe/m	144,8	98,4	77,1	64,5
FMX (kN)	2189,7	2667,8	3070,4	3424,7
CSX (MPa)	17,737	21,569	24,794	27,639
TSX (MPa)	0,426	0,814	1,026	1,113
ENTHRU (kJ)	22,4	33,5	44,6	55,6
Res. Ativ. (kN)	1600	1600	1600	1600
Eficiência (%)	58	58	58	58

## Dados da Simulação

### *Estaca Curta*

L (m)	9,0
D (cm)	60
L/D	15
Ru (kN)	2000

### Peso do Martelo

X1 (%)	W (kN)
1,0	20
1,5	30
2,0	40
2,5	50
3,0	60

### *Altura de Queda*

X2	H (m)
2	1,2
3	1,8
4	2,4
5	3,0

### *Rigidez do Amortecimento*

X3 L/D	t (cm)	k (kN/mm)
L/2D	7,5	994
L/2,5D	6,0	1242
L/3D	5,0	1490
L/4D	3,8	1987
L/5D	3,0	2484
L/6D	2,5	2981

Estaca Curta: η = 30 %, espessura em função de L/D

W (kN)																																							
20										2684										2881																			
K (kN/mm)										1987										2484										2881									
H (mm)										1480										2684										2881									
994										1987										2484										2881									
1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0																				
0,06	0,54	0,97	1,37	0,10	0,58	1,01	1,41	0,12	0,61	1,04	1,44	0,15	0,64	1,07	1,46	0,17	0,65	1,08	1,48																				
9999,0	1585,2	1032,3	732,1	9999,0	1724,9	986,2	709,1	8099,7	1647,7	960,1	696,4	6532,6	1566,0	932,2	682,7	6010,7	1530,8	922,3	678,0																				
3003,1	2851,6	3310,5	3712,8	2448,6	3037,1	3529,1	3953,6	2663,5	3184,4	3706,9	4158,3	2726,7	3413,4	3976,4	4460,6	2844,6	3574,4	4185,6	4701,8																				
8,363	12,393	13,068	13,535	8,870	11,013	12,785	14,381	9,246	11,520	13,388	15,039	9,828	12,288	14,309	16,110	10,128	12,668	14,993	16,893																				
2,072	2,599	2,958	3,284	2,573	3,150	3,597	3,902	2,890	3,560	3,990	4,372	3,362	4,024	4,586	4,986	3,625	4,386	4,934	5,310																				
ENTHRU (kJ)	4,9	7,2	9,5	11,8	5,1	7,6	10,0	12,4	5,3	7,9	10,4	12,9	5,5	8,3	11,0	13,6	5,7	8,5	11,3																				
Res. Ativ. (kN)	1936	2000	2000	2000	1947	2000	2000	1963	2000	2000	2000	1961	2000	2000	2000	1964	2000	2000	2000																				
Eficiência (%)	20	20	20	20	21	21	21	22	22	22	22	23	23	23	23	24	24	24	24																				
30																																							
K (kN/mm)																																							
994																																							
1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0																				
0,72	1,49	2,16	2,76	1,27	1,53	2,20	2,80	0,80	1,56	2,23	2,82	0,83	1,59	2,25	2,84	0,84	1,60	2,26	2,85																				
1385,0	671,5	462,4	361,8	1299,3	652,1	454,1	357,0	1251,6	640,6	449,1	354,2	1206,4	623,0	444,1	352,1	1185,9	623,9	443,9	351,0																				
9847,1	1585,2	1032,3	732,1	9847,1	1724,9	986,2	709,1	8099,7	1647,7	960,1	696,4	6532,6	1566,0	932,2	682,7	6010,7	1530,8	922,3	678,0																				
3003,1	2851,6	3310,5	3712,8	2448,6	3037,1	3529,1	3953,6	2663,5	3184,4	3706,9	4158,3	2726,7	3413,4	3976,4	4460,6	2844,6	3574,4	4185,6	4701,8																				
8,363	12,393	13,068	13,535	8,870	11,013	12,785	14,381	9,246	11,520	13,388	15,039	9,828	12,288	14,309	16,110	10,128	12,668	14,993	16,893																				
2,072	2,599	2,958	3,284	2,573	3,150	3,597	3,902	2,890	3,560	3,990	4,372	3,362	4,024	4,586	4,986	3,625	4,386	4,934	5,310																				
ENTHRU (kJ)	4,9	7,2	9,5	11,8	5,1	7,6	10,0	12,4	5,3	7,9	10,4	12,9	5,5	8,3	11,0	13,6	5,7	8,5	11,3																				
Res. Ativ. (kN)	1936	2000	2000	2000	1947	2000	2000	1963	2000	2000	2000	1961	2000	2000	2000	1964	2000	2000	2000																				
Eficiência (%)	20	20	20	20	21	21	21	22	22	22	22	23	23	23	23	24	24	24	24																				
40																																							
K (kN/mm)																																							
994																																							
1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0																				
0,72	1,49	2,16	2,76	1,27	1,53	2,20	2,80	0,80	1,56	2,23	2,82	0,83	1,59	2,25	2,84	0,84	1,60	2,26	2,85																				
1385,0	671,5	462,4	361,8	1299,3	652,1	454,1	357,0	1251,6	640,6	449,1	354,2	1206,4	623,0	444,1	352,1	1185,9	623,9	443,9	351,0																				
9847,1	1585,2	1032,3	732,1	9847,1	1724,9	986,2	709,1	8099,7	1647,7	960,1	696,4	6532,6	1566,0	932,2	682,7	6010,7	1530,8	922,3	678,0																				
3003,1	2851,6	3310,5	3712,8	2448,6	3037,1	3529,1	3953,6	2663,5	3184,4	3706,9	4158,3	2726,7	3413,4	3976,4	4460,6	2844,6	3574,4	4185,6	4701,8																				
8,363	12,393	13,068	13,535	8,870	11,013	12,785	14,381	9,246	11,520	13,388	15,039	9,828	12,288	14,309	16,110	10,128	12,668	14,993	16,893																				
2,072	2,599	2,958	3,284	2,573	3,150	3,597	3,902	2,890	3,560	3,990	4,372	3,362	4,024	4,586	4,986	3,625	4,386	4,934	5,310																				
ENTHRU (kJ)	4,9	7,2	9,5	11,8	5,1	7,6	10,0	12,4	5,3	7,9	10,4	12,9	5,5	8,3	11,0	13,6	5,7	8,5	11,3																				
Res. Ativ. (kN)	1936	2000	2000	2000	1947	2000	2000	1963	2000	2000	2000	1961	2000	2000	2000	1964	2000	2000	2000																				
Eficiência (%)	20	20	20	20	21	21	21	22	22	22	22	23	23	23	23	24	24	24	24																				
50																																							
K (kN/mm)																																							
994																																							
1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0																				
0,72	1,49	2,16	2,76	1,27	1,53	2,20	2,80	0,80	1,56	2,23	2,82	0,83	1,59	2,25	2,84	0,84	1,60	2,26	2,85																				
1385,0	671,5	462,4	361,8	1299,3	652,1	454,1	357,0	1251,6	640,6	449,1	354,2	1206,4	623,0	444,1	352,1	1185,9	623,9	443,9	351,0																				
9847,1	1585,2	1032,3	732,1	9847,1	1724,9	986,2	709,1	8099,7	1647,7	960,1	696,4	6532,6	1566,0	932,2	682,7	6010,7	1530,8	922,3	678,0																				
3003,1	2851,6	3310,5	3712,8	2448,6	3037,1	3529,1	3953,6	2663,5	3184,4	3706,9	4158,3	2726,7	3413,4	3976,4	4460,6	2844,6	3574,4	4185,6	4701,8																				
8,363	12,393	13,068	13,535	8,870	11,013	12,785	14,381	9,246	11,520	13,388	15,039	9,828	12,288	14,309	16,110	10,128	12,668	14,993	16,893																				
2,072	2,599	2,958	3,284	2,573	3,150	3,597	3,902	2,890	3,560	3,990	4,372	3,362	4,024	4,586	4,986	3,625	4,386	4,934	5,310																				
ENTHRU (kJ)	4,9	7,2	9,5	11,8	5,1	7,6	10,0	12,4	5,3	7,9	10,4	12,9	5,5	8,3	11,0	13,6	5,7	8,5	11,3																				
Res. Ativ. (kN)	1936	2000	2000	2000	1947	2000	2000	1963	2000	2000	2000	1961	2000	2000	2000	1964	2000	2000	2000																				
Eficiência (%)	20	20	20	20	21	21	21	22	22	22	22	23	23	23	23	24	24	24	24																				
60																																							
K (kN/mm)																																							
994																																							
1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0																				
0,72	1,49	2,16	2,76	1,27	1,53	2,20	2,80	0,80	1,56	2,23	2,82	0,83	1,59	2,25	2,84	0,84	1,60	2,26	2,85																				
1385,0	671,5	462,4	361,8	1299,3	652,1	454,1	357,0	1251,6	640,6	449,1	354,2	1206,4	623,0	444,1	352,1	1185,9	623,9	443,9	351,0																				
9847,1	1585,2	1032,3	732,1	9847,1	1724,9	986,2	709,1	8099,7	1647,7	960,1	696,4	6532,6	1566,0	932,2	682,7	6010,7	1530,8	922,3	678,0																				
3003,1	2851,6	3310,5	3712,8	2448,6	3037,1	3529,1	3953,6	2663,5	3184,4	3706,9	4158,3	2726,7	3413,4	3976,4	4460,6	2844,6	3574,4	4185,6	4701,8																				
8,363	12,393	13,068	13,535	8,870	11,013	12,785	14,381	9,246	11,520	13,388	15,039	9,828	12,288	14,309	16,110	10,128	12,668	14,993	16,893																				
2,072	2,599	2,958	3,284	2,573	3,150	3,597	3,902	2,890	3,560	3,990	4,372	3,362	4,024	4,586	4,986	3,625	4,386	4,934	5,310																				
ENTHRU (kJ)	4,9	7,2	9,5	11,8	5,1	7,6	10,0	12,4	5,3	7,9	10,4	12,9	5,5	8,3	11,0	13,6	5,7	8,5	11,3																				
Res. Ativ. (kN)	1936	2000	2000	2000	1947	2000	2000	1963	2000	2000	2000	1961	2000	2000	2000	1964	2000	2000	2000																				
Eficiência (%)	20	20	20	20	21	21	21	22	22	22	22	23	23	23	23	24	24	24	24																				
80																																							
K (kN/mm)																																							
994																																							
1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0																				
0,72	1,49	2,16	2,76	1,27	1,53	2,20	2,80	0,80	1,56	2,23	2,82	0,83	1,59	2,25	2,84	0,84	1,60	2,26	2,85																				
1385,0	671,5	462,4	361,8	1299,3	652,1	454,1	357,0	1251,6	640,6	449,1	354,2	1206,4	623,0	444,1	352,1	1185,9	623,9	443,9	351,0																				
9847,1	1585,2	1032,3	732,1	9847,1	1724,9	986,2	709,1	8099,7	1647,7	960,1	696,4	6532,6	1566,0	932,2	682,7	6010,7	1530,8	922,3	678,0																				
3003,1	2851,6	3310,5	3712,8	2448,6	3037,1	3529,1	3953,6	2663,5	3184,4	3706,9	4158,3	2726,7	3413,4	3976,4	4460,6	2844,6	3574,4	4185,6	4701,8																				
8,363	12,393	13,068	13,535	8,870	11,013	12,785	14,381	9,246	11,520	13,388	15,039	9,828	12,288	14,309	16,110	10,128	12,668	14,993	16,893																				
2,072	2,599	2,958	3,284	2,573	3,150	3,597	3,902	2,890	3,560	3,990	4,372	3,362	4,024	4,586	4,986	3,625	4,386	4,934	5,310																				
ENTHRU (kJ)	4,9	7,2	9,5	11,8	5,1	7,6	10,0	12,4	5,3	7,9	10,4	12,9	5,5	8,3	11,0	13,6	5,7	8,5	11,3																				
Res. Ativ. (kN)	1936	2000	2000	2000	1947	2000	2000	1963	2000	2000	2000	1961	2000	2000	2000	1964	2000	2000	2000																				
Eficiência (%)	20	20	20	20	21	21	21	22	22	22	22	23	23	23	23	24	24	24	24																				
100																																							
K (kN/mm)																																							
994																																							
1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0	1,2	1,8	2,4	3,0																				
0,72	1,49	2,16	2,76	1,27	1,53	2,20	2,80	0,80	1,56	2,23	2,82	0,83	1,59	2,25	2,84	0,84	1,60	2,26	2,85																				
1385,0	671,5	462,4	361,8	1299,3	652,1	454																																	



Estaca Curta: $\eta = 65\%$ , espessura em função de L/D									
20									
W (kN)									
K (kN/mm)									
H (mm)	1,2	1,8	2,4	3,0	1490	1987	2484	2981	
SET (mm)	1,11	1,91	2,80	3,22	1,18	1,97	2,85	3,26	3,0
Golpe/m	904,6	524,6	385,3	310,4	868,7	513,4	379,8	307,9	850,4
FMX (kN)	3450,2	4240,7	4905,6	5496,0	3676,7	4523,6	5241,8	5873,5	6177,7
CSX (MPa)	12,577	15,517	18,018	20,223	13,336	16,494	19,139	21,469	13,951
TSX (MPa)	3,077	3,623	3,998	4,404	3,712	4,311	4,786	5,141	4,107
ENHTRU (kJ)	10,3	15,2	20,0	24,8	10,8	16,0	21,1	26,2	11,2
Res. Ativ. (kN)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Efficiência (%)	43	42	42	41	45	44	44	44	47
30									
W (kN)									
K (kN/mm)									
H (mm)	1,2	1,8	2,4	3,0	1490	1987	2484	2981	
SET (mm)	2,37	3,57	4,59	5,49	2,41	3,60	4,62	5,52	3,0
Golpe/m	422,0	280,2	217,9	182,1	415,3	277,6	216,6	181,3	411,3
FMX (kN)	3984,1	4836,0	5664,0	6340,1	4219,3	5185,2	6001,2	6719,0	4405,9
CSX (MPa)	14,718	18,101	20,934	23,395	15,508	19,146	22,158	24,751	16,140
TSX (MPa)	0,827	0,916	1,016	1,165	1,013	1,314	1,468	1,689	1,590
ENHTRU (kJ)	16,7	24,7	32,6	40,4	17,5	25,8	34,1	42,3	18,0
Res. Ativ. (kN)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Efficiência (%)	46	46	45	45	49	48	47	47	50
40									
W (kN)									
K (kN/mm)									
H (mm)	1,2	1,8	2,4	3,0	1490	1987	2484	2981	
SET (mm)	3,68	5,28	6,63	7,82	3,72	5,30	6,64	7,82	3,0
Golpe/m	271,5	189,4	150,8	127,8	269,0	189,8	150,7	127,9	268,4
FMX (kN)	4396,2	5401,9	6250,5	6996,4	4628,9	5688,5	6582,5	7370,3	4819,8
CSX (MPa)	16,290	19,296	22,966	25,692	17,154	21,005	24,243	27,091	17,824
TSX (MPa)	0,661	1,000	1,367	1,670	0,551	0,725	0,969	1,278	0,599
ENHTRU (kJ)	23,8	35,2	46,4	57,6	24,8	36,6	48,4	60,1	25,5
Res. Ativ. (kN)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Efficiência (%)	50	49	48	48	52	51	50	50	53
50									
W (kN)									
K (kN/mm)									
H (mm)	1,2	1,8	2,4	3,0	1490	1987	2484	2981	
SET (mm)	5,03	6,99	8,64	10,09	5,06	7,02	8,68	10,13	3,0
Golpe/m	198,7	143,1	115,7	99,1	197,6	142,5	115,3	98,7	197,4
FMX (kN)	4741,8	5826,1	6739,2	7542,8	4866,3	6102,9	7060,4	7901,8	5143,8
CSX (MPa)	17,486	21,405	24,725	27,650	18,357	22,455	25,923	28,997	19,050
TSX (MPa)	0,829	0,966	1,069	1,141	0,808	0,968	1,070	1,201	0,792
ENHTRU (kJ)	31,0	45,8	60,4	75,0	32,2	47,7	63,0	78,2	33,1
Res. Ativ. (kN)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Efficiência (%)	52	51	50	50	54	53	53	52	55
60									
W (kN)									
K (kN/mm)									
H (mm)	1,2	1,8	2,4	3,0	1490	1987	2484	2981	
SET (mm)	6,26	8,52	10,43	12,13	6,33	8,60	10,52	12,20	3,0
Golpe/m	159,8	117,4	95,8	82,5	158,0	116,3	95,1	81,9	157,2
FMX (kN)	5047,7	6196,8	7163,2	8012,8	5260,9	6460,6	7474,5	8366,4	5429,5
CSX (MPa)	18,556	22,732	26,239	29,320	19,373	23,731	27,406	30,636	20,032
TSX (MPa)	0,858	0,706	0,514	0,440	0,906	0,756	0,549	0,451	0,946
ENHTRU (kJ)	37,9	56,2	74,4	92,4	39,6	58,6	77,5	96,3	40,7
Res. Ativ. (kN)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Efficiência (%)	53	52	52	51	56	54	54	54	57

## Dados da Simulação

### *Estaca Média*

L (m)	15,0
D (cm)	50
L/D	30
Ru (kN)	1800

### Peso do Martelo

X1 (%)	W (kN)
1,0	18
1,5	27
2,0	36
2,5	45
3,0	54

### *Altura de Queda*

X2	H (m)
2	1,0
3	1,5
4	2,0
5	2,5

### *Rigidez do Amortecimento*

X3 L/D	t (cm)	k (kN/mm)
L/2D	15,0	345
L/2,5D	12,0	431
L/3D	10,0	518
L/4D	7,5	690
L/5D	6,0	863
L/6D	5,0	1035

Estaca Média. η = 30 %, espessura em função de L/D																								
18																								
W (kN)	345				431				518				680				863				1035			
K (kN/mm)	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5				
H (mm)	-0.47	0.06	0.54	0.98	-0.37	0.17	0.66	1.10	-0.30	0.25	0.74	1.18	-0.22	0.34	0.83	1.27	-0.16	0.39	0.89	1.32				
SET (mm)	9999.0	9999.0	1838.5	1016.5	9999.0	5884.4	1516.3	908.6	9999.0	4068.7	1356.8	848.4	9999.0	2948.8	1203.6	786.9	9999.0	2535.8	1129.2	755.0				
Golpe/m	1308.9	1608.2	1861.0	2083.8	1403.5	1725.9	1998.8	2238.8	1481.0	1826.3	2115.2	2368.0	1803.4	1882.1	2297.7	2572.5	1897.8	2101.8	2438.3	2736.2				
FMX (kN)	6.922	8.525	9.880	11.059	7.395	9.117	10.572	11.853	7.791	9.610	11.140	12.503	8.400	10.382	12.044	13.525	8.861	10.966	12.755	14.316				
CSX (MPa)	2.441	2.876	3.178	3.527	2.796	3.271	3.711	4.072	3.056	3.618	4.109	4.505	3.517	4.190	4.719	5.172	3.860	4.612	5.163	5.648				
ENTHRU (kJ)	3.2	4.7	6.3	7.8	3.4	5.1	6.7	8.3	3.6	5.4	7.1	8.8	3.9	5.8	7.6	9.5	4.1	6.0	8.0	9.9				
Res. Ativ. (kN)	1553	1610	1662	1710	1564	1622	1675	1722	1571	1630	1683	1731	1580	1640	1693	1741	1586	1646	1699	1746				
Eficiência (%)	18	17	18	17	19	19	19	18	20	20	20	20	22	21	21	21	23	22	22	23				
27																								
W (kN)	345				431				518				680				863				1035			
K (kN/mm)	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5				
H (mm)	0.15	0.97	1.67	2.31	0.28	1.11	1.81	2.46	0.37	1.20	1.90	2.55	0.47	1.30	2.00	2.65	0.53	1.36	2.05	2.70				
SET (mm)	6753.0	1030.6	597.4	432.3	3657.1	902.5	551.3	406.5	2720.0	834.9	525.8	392.0	2120.5	769.9	499.9	376.9	1889.0	737.9	486.9	370.2				
Golpe/m	1542.4	1893.4	2189.0	2460.3	1641.3	2016.7	2332.9	2611.3	1723.5	2119.4	2452.4	2745.4	1852.5	2278.4	2638.8	2955.6	1949.6	2402.7	2781.7	3117.6				
FMX (kN)	8.226	10.056	11.581	12.933	8.729	10.715	12.349	13.785	9.139	11.246	12.991	14.503	9.773	12.050	13.961	15.610	10.252	12.652	14.684	16.460				
CSX (MPa)	1.121	1.346	1.506	1.675	1.538	1.787	2.139	2.438	1.635	2.260	2.681	3.006	2.337	2.946	3.433	3.811	2.737	3.418	3.922	4.351				
ENTHRU (kJ)	5.2	7.7	10.2	12.7	5.5	8.2	10.9	13.6	5.8	8.6	11.5	14.2	6.2	9.2	12.2	15.2	6.5	9.8	12.8	15.9				
Res. Ativ. (kN)	1619	1708	1784	1800	1634	1723	1799	1800	1643	1733	1800	1800	1654	1744	1800	1800	1661	1750	1800	1800				
Eficiência (%)	19	19	19	19	20	20	20	20	21	21	21	21	23	23	23	23	24	24	24	24				
36																								
W (kN)	345				431				518				680				863				1035			
K (kN/mm)	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5				
H (mm)	0.79	1.85	2.82	3.71	0.96	2.01	2.99	3.88	1.05	2.12	3.09	3.99	1.16	2.23	3.20	4.09	1.22	2.28	3.25	4.14				
SET (mm)	1263.7	539.4	355.0	269.5	1054.1	496.5	334.6	257.5	954.0	472.3	323.3	250.9	862.4	449.0	312.4	224.5	821.2	436.1	307.5	241.8				
Golpe/m	1732.8	2124.7	2455.0	2745.1	1831.1	2248.1	2599.1	2907.5	1912.5	2349.5	2717.0	3040.2	2038.5	2505.3	2886.4	3246.1	2194.4	2624.2	3088.4	3403.3				
FMX (kN)	9.192	11.226	12.937	14.438	9.725	11.877	13.701	15.302	10.165	12.418	14.326	16.006	10.826	13.266	15.294	17.087	11.295	13.896	16.044	17.928				
CSX (MPa)	0.562	0.500	0.529	0.626	0.566	0.645	0.737	0.832	0.745	0.864	1.030	1.163	1.081	1.276	1.591	1.858	1.374	1.588	2.008	2.515				
ENTHRU (kJ)	7.2	10.7	14.3	17.8	7.7	11.5	15.2	19.0	8.1	12.0	16.0	19.9	8.6	12.8	17.0	21.2	8.9	13.3	17.7	22.0				
Res. Ativ. (kN)	1689	1800	1800	1800	1706	1800	1800	1800	1717	1800	1800	1800	1729	1800	1800	1800	1735	1800	1800	1800				
Eficiência (%)	20	20	20	20	21	21	21	21	23	22	22	22	24	24	24	24	25	25	25	25				
45																								
W (kN)	345				431				518				680				863				1035			
K (kN/mm)	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5				
H (mm)	1.43	2.78	4.03	5.16	1.61	2.97	4.22	5.36	1.71	3.09	4.33	5.45	1.83	3.21	4.45	5.58	1.88	3.26	4.49	5.60				
SET (mm)	897.4	359.2	246.0	193.7	625.0	336.4	237.0	187.0	584.1	323.6	230.8	183.3	546.8	311.5	224.9	179.8	530.7	306.4	222.5	178.5				
Golpe/m	1895.2	2324.8	2681.6	2995.9	1996.0	2446.3	2824.9	3157.1	2074.5	2544.4	2941.0	3289.3	2193.7	2695.3	3116.6	3488.3	2284.5	2807.7	3250.0	3638.9				
FMX (kN)	10.036	12.237	14.087	15.714	10.556	12.888	14.848	16.571	10.974	13.416	15.468	17.272	11.625	14.215	16.405	18.333	12.118	14.823	17.103	19.125				
CSX (MPa)	0.468	0.500	0.732	0.965	0.483	0.548	0.763	0.963	0.468	0.538	0.698	0.883	0.525	0.531	0.564	0.690	0.566	0.655	0.717	0.783				
ENTHRU (kJ)	9.4	14.1	18.7	23.3	10.0	14.9	19.8	24.6	10.4	15.5	20.6	25.7	11.0	16.5	21.9	27.2	11.4	17.1	22.7	28.3				
Res. Ativ. (kN)	1758	1800	1800	1800	1777	1800	1800	1800	1788	1800	1800	1800	1780	1800	1800	1800	1795	1800	1800	1800				
Eficiência (%)	21	21	21	21	22	22	22	22	23	23	23	23	24	24	24	24	25	25	25	25				
54																								
W (kN)	345				431				518				680				863				1035			
K (kN/mm)	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5				
H (mm)	2.09	3.60	5.31	6.87	2.27	3.96	5.49	6.85	2.40	4.10	5.61	6.95	2.53	4.23	5.72	7.05	2.59	4.28	5.76	7.09				
SET (mm)	478.4	263.3	168.2	149.9	439.6	251.0	162.0	146.0	417.1	243.7	178.4	143.9	395.5	236.6	174.9	141.8	386.3	233.7	173.6	141.0				
Golpe/m	2046.9	2501.5	2881.4	3215.8	2142.6	2620.8	3021.9	3375.4	2217.8	2716.5	3134.9	3503.7	2330.5	2860.1	3303.9	3695.9	2414.3	2966.4	3430.6	3838.2				
FMX (kN)	10.788	13.132	15.000	16.831	11.294	13.773	15.890	17.683	11.702	14.286	16.455	18.364	12.310	15.058	17.365	19.389	12.765	15.619	18.033	20.158				
CSX (MPa)	0.459	0.499	0.568	0.656	0.471	0.523	0.643	0.853	0.476	0.537	0.728	0.974	0.474	0.568	0.800	1.022	0.466	0.572	0.747	0.886				
ENTHRU (kJ)	11.8	17.6	23.4	29.2	12.5	18.7	24.8	30.8	13.0	19.4	25.8	32.1	13.6	20.4	27.1	33.7	14.1	21.0	27.9	34.8				
Res. Ativ. (kN)	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800				
Eficiência (%)	22	22	22	22	23	23	23	23	24	24	24	24	25	25	25	25	26	26	26	26				

Estaca Média: η = 65 %, espessura em função de L/D									
18									
W (kN)									
K (kN/mm)									
H (m)									
SET (mm)	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Golpe/m	1437,0	637,8	432,0	331,7	261,9	212,9	176,2	145,5	120,8
FMK (kN)	1938,1	2379,4	2751,6	3079,2	3308,9	3509,9	3684,2	3832,5	3963,8
CSX (MPa)	10,293	12,615	14,534	16,225	17,444	18,311	18,911	19,311	19,561
TSX (MPa)	3,200	3,953	4,460	4,908	5,303	5,657	5,970	6,241	6,476
ENTHRU (kJ)	6,8	10,0	13,2	16,5	19,8	23,2	26,6	29,9	33,2
Res. Atir (kN)	1679	1773	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
Eficiência (%)	38	37	37	37	37	37	37	37	37
27									
W (kN)									
K (kN/mm)									
H (m)									
SET (mm)	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Golpe/m	189	321	438	543	636	718	789	850	901
FMK (kN)	529,4	311,3	228,3	164,2	120,8	90,1	68,4	52,9	40,1
CSX (MPa)	12,048	14,732	16,990	18,974	20,728	22,289	23,684	24,944	26,099
TSX (MPa)	1,568	2,019	2,394	2,721	2,999	3,241	3,454	3,636	3,794
ENTHRU (kJ)	11,0	16,4	21,7	26,9	31,9	36,6	41,0	45,3	49,6
Res. Atir (kN)	41	40	40	40	40	40	40	40	40
Eficiência (%)	41	40	40	40	40	40	40	40	40
36									
W (kN)									
K (kN/mm)									
H (m)									
SET (mm)	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Golpe/m	312	493	649	788	906	1006	1091	1163	1224
FMK (kN)	2655,5	3129,4	3612,0	4037,3	4409,3	4731,3	5009,3	5249,3	5454,3
CSX (MPa)	13,457	16,429	18,930	21,136	23,021	24,628	26,006	27,206	28,286
TSX (MPa)	0,555	0,551	1,512	1,943	2,211	2,411	2,581	2,731	2,861
ENTHRU (kJ)	15,4	23,0	30,5	37,9	45,3	52,7	60,1	67,5	74,9
Res. Atir (kN)	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
Eficiência (%)	43	43	42	42	42	42	42	42	42
43									
W (kN)									
K (kN/mm)									
H (m)									
SET (mm)	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Golpe/m	312	493	649	788	906	1006	1091	1163	1224
FMK (kN)	2655,5	3129,4	3612,0	4037,3	4409,3	4731,3	5009,3	5249,3	5454,3
CSX (MPa)	13,457	16,429	18,930	21,136	23,021	24,628	26,006	27,206	28,286
TSX (MPa)	0,555	0,551	1,512	1,943	2,211	2,411	2,581	2,731	2,861
ENTHRU (kJ)	15,4	23,0	30,5	37,9	45,3	52,7	60,1	67,5	74,9
Res. Atir (kN)	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
Eficiência (%)	43	43	42	42	42	42	42	42	42
45									
W (kN)									
K (kN/mm)									
H (m)									
SET (mm)	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Golpe/m	442	669	863	1036	1199	1352	1495	1628	1751
FMK (kN)	2790,4	3411,9	3933,6	4393,6	4799,6	5161,6	5489,6	5783,6	6043,6
CSX (MPa)	14,651	17,669	20,572	22,956	25,001	26,751	28,251	29,551	30,751
TSX (MPa)	0,507	1,411	2,061	2,531	2,901	3,191	3,441	3,661	3,861
ENTHRU (kJ)	20,2	30,2	40,2	49,8	58,8	67,3	75,3	82,8	90,3
Res. Atir (kN)	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
Eficiência (%)	45	45	44	44	44	44	44	44	44
54									
W (kN)									
K (kN/mm)									
H (m)									
SET (mm)	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Golpe/m	578	849	1080	1284	1464	1628	1779	1916	2041
FMK (kN)	2997,1	3693,5	4214,3	4703,9	5169,9	5611,9	6031,9	6431,9	6811,9
CSX (MPa)	15,699	19,123	22,003	24,538	26,751	28,601	30,151	31,501	32,651
TSX (MPa)	0,581	1,023	1,613	2,077	2,411	2,641	2,841	3,011	3,161
ENTHRU (kJ)	25,3	37,7	50,0	62,3	74,6	86,9	99,2	111,5	123,8
Res. Atir (kN)	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
Eficiência (%)	47	47	46	46	46	46	46	46	46

## Dados da Simulação

### *Estaca Longa*

L (m)	20,0
D (cm)	40
L/D	50
Ru (kN)	1600

### Peso do Martelo

X1 (%)	W (kN)
1,0	16
1,5	24
2,0	32
2,5	40
3,0	48

### *Altura de Queda*

X2	H (m)
2	0,8
3	1,2
4	1,6
5	2,0

### *Rigidez do Amortecimento*

X3 L/D	t (cm)	k (kN/mm)
L/2D	25,0	132
L/2,5D	20,0	166
L/3D	16,7	199
L/4D	12,5	265
L/5D	10,0	331
L/6D	8,3	397

Estaca Longa. η = 30 %, espessura em função de L/D																								
16																								
W (kN)	132				166				199				265				331				397			
K (kN/mm)	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0				
H (m)	-0,74	-0,16	0,35	0,79	-0,52	0,09	0,61	1,05	-0,36	0,26	0,78	1,23	-0,35	0,14	0,63	1,14	-0,24	0,28	0,79	1,32				
SET (mm)	9999,0	9999,0	2887,5	1265,6	9999,0	9999,0	1647,4	9611,2	9999,0	3789,2	1275,0	813,1	9999,0	7063,3	1588,8	875,1	9999,0	3609,7	1273,3	759,7				
Go/p/e/m	741,4	903,9	1040,3	1160,2	795,7	971,9	1119,6	1249,8	939,7	1027,0	1184,3	1322,1	896,5	1101,4	1273,2	1425,3	963,4	1172,4	1366,9	1519,4				
FNX (kN)	6,113	7,435	8,531	9,491	6,570	7,984	9,168	10,212	6,927	8,426	9,688	10,795	7,368	9,039	10,463	11,883	7,799	9,594	11,113	12,432				
CSX (MPa)	0,851	1,235	1,139	0,994	0,936	1,206	0,926	1,076	1,016	1,004	1,069	1,251	2,169	2,636	3,019	3,224	2,453	2,680	3,166	3,363				
TSX (MPa)	1,9	2,9	3,9	4,9	2,1	3,2	4,3	5,4	2,3	3,5	4,7	5,8	2,6	3,9	5,2	6,5	2,8	4,2	5,5	6,8				
ENTHRU (kJ)	1246	1309	1418	1512	1263	1363	1473	1568	1271	1400	1511	1600	1504	1536	1600	1600	1511	1559	1600	1600				
Res. Ativ. (kN)	15	15	15	15	16	17	17	17	18	18	18	18	20	20	20	20	22	22	21	21				
Eficiência (%)																								
24																								
W (kN)	132				166				199				265				331				397			
K (kN/mm)	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0				
H (m)	-0,29	0,51	1,18	1,86	-0,01	0,81	1,51	2,26	0,19	1,01	1,76	2,53	0,05	0,87	1,76	2,62	0,20	1,07	1,98	2,84				
SET (mm)	9999,0	1944,9	860,6	538,3	9999,0	1235,0	663,1	442,2	5360,7	991,1	569,5	394,7	9999,0	1145,6	566,7	381,2	4897,7	932,9	505,8	362,6				
Go/p/e/m	890,1	1079,8	1237,3	1376,6	947,1	1150,3	1321,0	1471,3	992,5	1207,5	1388,5	1547,3	1042,0	1276,1	1476,4	1650,7	1099,4	1349,5	1560,1	1745,1				
FNX (kN)	7,312	8,825	10,097	11,213	7,774	9,404	10,773	11,978	8,145	9,867	11,316	12,590	8,596	10,462	12,077	13,479	9,051	11,069	12,752	14,238				
CSX (MPa)	0,555	0,688	0,707	0,790	0,732	0,776	0,791	0,876	0,751	0,731	0,766	0,851	1,425	1,942	2,168	2,362	1,720	2,166	2,413	2,647				
ENTHRU (kJ)	3,1	4,8	6,5	8,2	3,5	5,3	7,1	9,0	3,7	5,7	7,6	9,6	4,2	6,3	8,4	10,5	4,5	6,7	8,8	11,0				
Res. Ativ. (kN)	1282	1454	1595	1600	1343	1517	1600	1600	1385	1559	1600	1600	1520	1600	1600	1600	1546	1600	1600	1600				
Eficiência (%)	16	17	17	17	18	18	18	19	19	20	20	20	22	22	22	23	23	23	24	24				
32																								
W (kN)	132				166				199				265				331				397			
K (kN/mm)	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0				
H (m)	0,17	1,12	2,11	4,73	0,48	1,48	2,58	3,66	0,69	1,75	2,89	3,98	0,49	1,77	3,03	4,21	0,69	2,01	3,27	4,45				
SET (mm)	6007,8	889,4	473,3	316,4	2061,2	675,7	367,3	273,2	1441,1	570,4	345,4	251,1	2027,1	586,5	323,9	237,5	1489,3	496,2	305,5	224,9				
Go/p/e/m	1011,3	1219,6	1394,9	1546,9	1068,5	1292,0	1479,9	1645,4	1114,0	1349,7	1547,6	1722,3	1150,5	1417,5	1635,1	1826,5	1213,5	1486,8	1716,7	1918,5				
FNX (kN)	8,274	9,945	11,360	12,585	8,739	10,532	12,038	13,364	9,108	10,988	12,586	13,984	9,514	11,596	13,340	14,878	9,961	12,157	14,005	15,628				
CSX (MPa)	0,354	0,332	0,460	0,536	0,393	0,399	0,474	0,480	0,498	0,510	0,575	0,619	0,986	1,056	1,187	1,323	1,260	1,377	1,535	1,705				
ENTHRU (kJ)	4,3	6,8	9,2	11,6	4,9	7,5	10,1	12,7	5,3	8,0	10,8	13,5	5,9	8,8	11,7	14,6	6,2	9,3	12,3	15,0				
Res. Ativ. (kN)	1380	1584	1600	1600	1447	1600	1600	1600	1492	1600	1600	1600	1595	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600				
Eficiência (%)	17	18	18	18	19	20	20	20	21	21	21	21	23	23	23	23	25	25	25	25				
40																								
W (kN)	132				166				199				265				331				397			
K (kN/mm)	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0				
H (m)	0,17	1,12	2,11	4,73	0,48	1,48	2,58	3,66	0,69	1,75	2,89	3,98	0,49	1,77	3,03	4,21	0,69	2,01	3,27	4,45				
SET (mm)	6007,8	889,4	473,3	316,4	2061,2	675,7	367,3	273,2	1441,1	570,4	345,4	251,1	2027,1	586,5	323,9	237,5	1489,3	496,2	305,5	224,9				
Go/p/e/m	1011,3	1219,6	1394,9	1546,9	1068,5	1292,0	1479,9	1645,4	1114,0	1349,7	1547,6	1722,3	1150,5	1417,5	1635,1	1826,5	1213,5	1486,8	1716,7	1918,5				
FNX (kN)	8,274	9,945	11,360	12,585	8,739	10,532	12,038	13,364	9,108	10,988	12,586	13,984	9,514	11,596	13,340	14,878	9,961	12,157	14,005	15,628				
CSX (MPa)	0,354	0,332	0,460	0,536	0,393	0,399	0,474	0,480	0,498	0,510	0,575	0,619	0,986	1,056	1,187	1,323	1,260	1,377	1,535	1,705				
ENTHRU (kJ)	4,3	6,8	9,2	11,6	4,9	7,5	10,1	12,7	5,3	8,0	10,8	13,5	5,9	8,8	11,7	14,6	6,2	9,3	12,3	15,0				
Res. Ativ. (kN)	1380	1584	1600	1600	1447	1600	1600	1600	1492	1600	1600	1600	1595	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600				
Eficiência (%)	17	18	18	18	19	20	20	20	21	21	21	21	23	23	23	23	25	25	25	25				
48																								
W (kN)	132				166				199				265				331				397			
K (kN/mm)	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0				
H (m)	0,59	1,81	3,22	4,60	0,93	2,30	3,77	5,15	1,16	2,63	4,12	5,50	1,02	2,75	4,37	5,86	1,27	3,02	4,63	6,11				
SET (mm)	1682,7	553,1	310,2	217,6	1079,2	435,0	265,3	194,1	889,5	379,7	242,6	181,7	984,8	363,5	228,6	170,7	790,1	331,3	215,9	163,8				
Go/p/e/m	1115,2	1339,4	1528,1	1694,2	1171,7	1411,3	1613,1	1790,6	1216,0	1468,0	1679,9	1866,9	1257,8	1534,8	1765,9	1971,5	1309,6	1600,8	1845,4	2060,4				
FNX (kN)	9,098	10,897	12,410	13,741	9,559	11,480	13,098	14,520	9,920	11,939	13,639	15,136	10,302	12,527	14,393	16,034	10,727	13,064	15,030	16,756				
CSX (MPa)	0,366	0,487	0,618	0,683	0,335	0,433	0,595	0,685	0,351	0,358	0,373	0,464	0,912	1,331	1,484	1,546	0,883	1,220	1,315	1,349				
ENTHRU (kJ)	5,8	9,0	12,2	15,4	6,4	9,8	13,3	16,7	6,8	10,4	14,0	17,6	7,6	11,4	15,1	18,9	8,2	12,3	16,4	20,8				
Res. Ativ. (kN)	1471	1600	1600	1600	1542	1600	1600	1600	1589	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600				
Eficiência (%)	18	19	19	19	20	20	21	21	21	22	22	22	24	24	24	24	26	26	26	26				
397																								
W (kN)	132				166				199				265				331				397			
K (kN/mm)	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0				
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0				
SET (mm)	1001,6	1001,6	223,6	162,6	1,36	3,22	4,47	6,15	1,56	3,59	5,41	7,08	1,64	3,80	5,77	7,56	1,92	4,08	6,04	7,81				
Go/p/e/m	1207,4	1444,8	1644,9	1821,1	1262,5	1515,5	1728,8	1916,4	1305,2	1570,6	1794,3	1991,1	1345,3	1636,7	1881,3	2086,5	1393,6	1699,2	1996,0	2161,8				
FNX (kN)	9,828	11,733	13,368	14,750	10,560	12,308	14,017	15,521	10,260	12,036	13,741	15,231	10,996	13,336	15,302	17,030	11,393	13,849	15,910	17,725				
CSX (MPa)	0,367	0,429	0,467	0,491	0,343	0,476	0,540	0,614	0,327	0,468	0,562	0,703	1,398	1,710	1,879	1,989	1,389	1,629	1,752	1,845				
ENTHRU (kJ)	7,2	11,2	15,2	19,2	8,0	12,3	16,6	20,0	8,6	13,1	17,6	22,0	9,3	14,1	18,8	23,4	9,7	14,6	19,5	24,4				
Res. Ativ. (kN)	1557	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600				
Eficiência (%)	19	19	20	20	20	21	22	23	24	24	24	24	26	26	26	26	26	26	26	26				

Estaca Longa. η = 65 %, espessura em função de L/D									
16									
W (kN)	132								
K (kN/mm)	166								
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8
SET (mm)	0,50	1,37	2,25	3,11	0,76	1,68	2,60	3,47	0,94
GoIpe/m	2000,2	726,5	443,7	322,0	1313,0	594,6	384,2	288,3	1064,1
FNAX (kN)	8861,9	1318,8	1518,6	1694,1	1164,7	1422,0	1637,9	1828,5	1232,1
CSX (MPa)	8,863	10,764	12,365	13,771	9,530	11,593	13,324	14,950	10,072
TSX (MPa)	1,093	0,984	1,229	1,424	0,969	1,275	1,489	1,653	1,148
ENTHRU (kJ)	4,3	6,5	8,6	10,8	4,7	7,1	9,4	11,8	5,0
Res. Ativ. (kN)	1451	1600	1600	1600	1506	1600	1600	1600	1544
Eficiência (%)	34	34	34	34	37	37	37	37	39
24									
W (kN)	132								
K (kN/mm)	166								
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8
SET (mm)	1,39	2,92	4,37	5,69	1,76	3,36	4,81	6,14	2,02
GoIpe/m	719,5	342,3	229,0	175,7	588,6	297,9	207,7	163,0	496,0
FNAX (kN)	1286,5	1561,4	1793,5	1997,4	1373,0	1670,3	1920,6	2140,7	1443,4
CSX (MPa)	10,464	12,695	14,555	16,191	11,190	13,573	15,578	17,342	11,757
TSX (MPa)	0,731	0,884	0,965	1,007	0,822	0,973	1,064	1,113	0,794
ENTHRU (kJ)	7,0	10,7	14,3	17,9	7,7	11,7	15,6	19,5	8,3
Res. Ativ. (kN)	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
Eficiência (%)	36	37	37	37	40	41	41	41	43
32									
W (kN)	132								
K (kN/mm)	166								
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8
SET (mm)	2,46	4,66	6,62	8,39	2,96	5,17	7,13	8,89	3,26
GoIpe/m	405,7	214,8	151,0	119,1	339,3	193,5	140,3	112,5	306,3
FNAX (kN)	1446,2	1753,4	2010,2	2236,6	1537,2	1864,6	2140,3	2383,2	1608,1
CSX (MPa)	11,777	14,224	16,263	18,095	12,497	15,120	17,331	19,276	13,068
TSX (MPa)	0,468	0,648	0,726	0,794	0,461	0,500	0,523	0,568	0,391
ENTHRU (kJ)	10,0	15,2	20,4	25,6	11,0	16,6	22,1	27,7	11,7
Res. Ativ. (kN)	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
Eficiência (%)	39	40	40	40	43	43	43	43	46
40									
W (kN)	132								
K (kN/mm)	166								
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8
SET (mm)	3,69	6,51	9,98	11,19	4,24	7,05	9,50	11,70	4,59
GoIpe/m	271,0	153,7	111,4	89,3	235,9	141,8	105,2	85,5	217,7
FNAX (kN)	1985,7	1914,7	2191,7	2435,7	1674,5	2026,3	2322,6	2583,6	1744,7
CSX (MPa)	12,871	15,507	17,727	19,882	13,590	16,409	18,762	20,873	14,157
TSX (MPa)	0,645	0,752	0,912	1,025	0,620	0,807	1,008	1,148	0,403
ENTHRU (kJ)	13,3	20,2	27,1	33,9	14,4	21,8	29,1	36,4	15,2
Res. Ativ. (kN)	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
Eficiência (%)	42	42	42	42	45	45	45	46	48
48									
W (kN)	132								
K (kN/mm)	166								
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8
SET (mm)	5,05	8,45	11,36	14,00	5,62	9,02	11,96	14,57	5,96
GoIpe/m	196,2	118,4	87,8	71,4	179,0	110,9	83,6	68,6	167,1
FNAX (kN)	1705,9	2055,0	2345,2	2606,0	1793,7	2165,8	2479,3	2755,4	1852,5
CSX (MPa)	13,826	16,623	19,980	21,055	14,538	17,519	20,031	22,242	15,095
TSX (MPa)	0,476	0,520	0,754	0,780	0,562	0,785	0,980,000	0,978	0,623
ENTHRU (kJ)	16,5	25,2	33,8	42,3	18,0	27,3	36,4	45,5	19,0
Res. Ativ. (kN)	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
Eficiência (%)	43	44	44	44	47	47	47	47	49
397									
W (kN)	331								
K (kN/mm)	265								
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8
SET (mm)	0,50	1,37	2,25	3,11	0,76	1,68	2,60	3,47	0,94
GoIpe/m	2000,2	726,5	443,7	322,0	1313,0	594,6	384,2	288,3	1064,1
FNAX (kN)	1081,9	1318,8	1518,6	1694,1	1164,7	1422,0	1637,9	1828,5	1232,1
CSX (MPa)	8,863	10,764	12,365	13,771	9,530	11,593	13,324	14,950	10,072
TSX (MPa)	1,093	0,984	1,229	1,424	0,969	1,275	1,489	1,653	1,148
ENTHRU (kJ)	4,3	6,5	8,6	10,8	4,7	7,1	9,4	11,8	5,0
Res. Ativ. (kN)	1451	1600	1600	1600	1506	1600	1600	1600	1544
Eficiência (%)	34	34	34	34	37	37	37	37	39
397									
W (kN)	331								
K (kN/mm)	265								
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8
SET (mm)	1,39	2,92	4,37	5,69	1,76	3,36	4,81	6,14	2,02
GoIpe/m	719,5	342,3	229,0	175,7	588,6	297,9	207,7	163,0	496,0
FNAX (kN)	1286,5	1561,4	1793,5	1997,4	1373,0	1670,3	1920,6	2140,7	1443,4
CSX (MPa)	10,464	12,695	14,555	16,191	11,190	13,573	15,578	17,342	11,757
TSX (MPa)	0,731	0,884	0,965	1,007	0,822	0,973	1,064	1,113	0,794
ENTHRU (kJ)	7,0	10,7	14,3	17,9	7,7	11,7	15,6	19,5	8,3
Res. Ativ. (kN)	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
Eficiência (%)	36	37	37	37	40	41	41	41	43
397									
W (kN)	331								
K (kN/mm)	265								
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8
SET (mm)	2,46	4,66	6,62	8,39	2,96	5,17	7,13	8,89	3,26
GoIpe/m	405,7	214,8	151,0	119,1	339,3	193,5	140,3	112,5	306,3
FNAX (kN)	1446,2	1753,4	2010,2	2236,6	1537,2	1864,6	2140,3	2383,2	1608,1
CSX (MPa)	11,777	14,224	16,263	18,095	12,497	15,120	17,331	19,276	13,068
TSX (MPa)	0,468	0,648	0,726	0,794	0,461	0,500	0,523	0,568	0,391
ENTHRU (kJ)	10,0	15,2	20,4	25,6	11,0	16,6	22,1	27,7	11,7
Res. Ativ. (kN)	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
Eficiência (%)	39	40	40	40	43	43	43	43	46
397									
W (kN)	331								
K (kN/mm)	265								
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8
SET (mm)	3,69	6,51	9,98	11,19	4,24	7,05	9,50	11,70	4,59
GoIpe/m	271,0	153,7	111,4	89,3	235,9	141,8	105,2	85,5	217,7
FNAX (kN)	1985,7	1914,7	2191,7	2435,7	1674,5	2026,3	2322,6	2583,6	1744,7
CSX (MPa)	12,871	15,507	17,727	19,882	13,590	16,409	18,762	20,873	14,157
TSX (MPa)	0,645	0,752	0,912	1,025	0,620	0,807	1,008	1,148	0,403
ENTHRU (kJ)	13,3	20,2	27,1	33,9	14,4	21,8	29,1	36,4	15,2
Res. Ativ. (kN)	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
Eficiência (%)	42	42	42	42	45	45	45	46	48
397									
W (kN)	331								
K (kN/mm)	265								
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8
SET (mm)	5,05	8,45	11,36	14,00	5,62	9,02	11,96	14,57	5,96
GoIpe/m	196,2	118,4	87,8	71,4	179,0	110,9	83,6	68,6	167,1
FNAX (kN)	1705,9	2055,0	2345,2	2606,0	1793,7	2165,8	2479,3	2755,4	1852,5
CSX (MPa)	13,826	16,623	19,980	21,055	14,538	17,519	20,031	22,242	15,095
TSX (MPa)	0,476	0,520	0,754	0,780	0,562	0,785	0,980,000	0,978	0,623
ENTHRU (kJ)	16,5	25,2	33,8	42,3	18,0	27,3	36,4	45,5	19,0
Res. Ativ. (kN)	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
Eficiência (%)	43	44	44	44	47	47	47	47	49
397									
W (kN)	331								
K (kN/mm)	265								
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8
SET (mm)	0,50	1,37	2,25	3,11	0,76	1,68	2,60	3,47	0,94
GoIpe/m	2000,2	726,5	443,7	322,0	1313,0	594,6	384,2	288,3	1064,1
FNAX (kN)	1081,9	1318,8	1518,6	1694,1	1164,7	1422,0	1637,9	1828,5	1232,1
CSX (MPa)	8,863	10,764	12,365	13,771	9,530	11,593	13,324	14,950	10,072
TSX (MPa)	1,093	0,984	1,229	1,424	0,969	1,275	1,489	1,653	1,148
ENTHRU (kJ)	4,3	6,5	8,6	10,8	4,7	7,1	9,4	11,8	5,0
Res. Ativ. (kN)	1451	1600	1600	1600	1506	1600	1600	1600	1544
Eficiência (%)	34	34	34	34	37	37	37	37	39
397									
W (kN)	331								
K (kN/mm)	265								
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8
SET (mm)	1,39	2,92	4,37	5,69	1,76	3,36	4,81	6,14	2,02
GoIpe/m	719,5	342,3	229,0	175,7	588,6	297,9	207,7	163,0	496,0
FNAX (kN)	1286,5	1561,4	1793,5	1997,4	1373,0	1670,3	1920,6	2140,7	1443,4
CSX (MPa)	10,464	12,695	14,555	16,191	11,190	13,573	15,578	17,342	11,757
TSX (MPa)	0,731	0,884	0,965	1,007	0,822	0,973	1,064	1,113	0,794
ENTHRU (kJ)	7,0	10,7	14,3	17,9	7,7	11,7	15,6	19,5	8,3
Res. Ativ. (kN)	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
Eficiência (%)	36	37	37	37	40	41	41	41	43
397									
W (kN)	331								
K (kN/mm)	265								
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8
SET (mm)	2,46	4,66	6,62	8,39	2,96	5,17	7,13	8,89	3,26
GoIpe/m	405,7	214,8	151,0	119,1	339,3	193,5	140,3	112,5	306,3
FNAX (kN)	1448,2	1753,4	2010,2	2236,6	1537,2	1864,6	2140,3	2383,2	1608,1
CSX (MPa)	11,777	14,224	16,263	18,095	12,497	15,120	17,331	19,276	13,068
TSX (MPa)	0,468	0,648	0,726	0,794	0,461	0,500	0,523	0,568	0,391
ENTHRU (kJ)	10,0	15,2	20,4	25,6	11,0	16,6	22,1	27,7	11,7
Res. Ativ. (kN)	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
Eficiência (%)	39	40	40	40	43	43	43	43	46
397									
W (kN)	331								
K (kN/mm)	265								
H (m)	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0	0,8
SET (mm									

## **APÊNDICE D**

### **VALIDAÇÃO PARA O BANCO DE DADOS**

$$W = 2 \%, H = 4D \text{ e } t = 0,25L/D$$



Diâmetro = 30 cm

$W = 2\% R_u$

$H = 4D$

$t = L/4D$

Estaca	E9A		E1983	
L (m)	11,5		10,1	
D (cm)	30		30	
L/D	38,3		33,7	
$R_u$ (kN)	1950,7		518,5	
W (kN)	39,0		10,4	
H (m)	1,2		1,2	
t (cm)	9,6		8,4	
k (kN/mm)	194		221	
$\eta$ (%)	30	65	30	65
SET (mm)	-1,04	1,69	2,75	6,45
Golpe/m	9999	592,9	364	155,1
FMX (kN)	1521,8	2063,2	720,1	1064,2
CSX (MPa)	21,766	30,578	10,938	15,985
TSX (MPa)	2,759	3,408	2,716	3,28
ENTHRU (kJ)	8,2	19	3	6,3
Res. Ativ. (kN)	1642	1951	472	518
Eficiência (%)	18	41	24	51





Diâmetro = 60 cm														
W = 2% Ru														
H=4D														
t=L/4D														
Estaca	E0647	E0674	E1693	E009	E084	E03	E18							
L (m)	17,4	18,7	21,3	16,0	17,1	8,0	7,5							
D (cm)	60	60	60	60	60	60	60							
L/D	29,0	31,2	36,5	26,7	28,5	13,3	12,5							
Ru (kN)	1327,4	1920	2969,8	2478,9	2482,1	1332,5	2160,5							
W (kN)	26,5	38,4	59,4	49,6	49,6	26,7	43,2							
H (m)	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4							
t (cm)	7,3	7,8	8,9	6,7	7,1	3,3	3,1							
k (kN/mm)	1028	956	840	1118	1046	2236	2385							
η (%)	30	65	30	65	30	65	30	65	30	65	30	65	30	65
SET (mm)	1,88	4,11	4,47	8,5	4,12	4,93	1,71	4,93	2,45	4,6	2,63	5,52	2,63	5,52
Golpe/m	532,5	243,3	223,9	117,7	243	203	583,8	203	409	217,5	380,3	181,2	380,3	181,2
FMX (kN)	3754,7	5555,8	4075,2	6015	4555,1	6516,1	6718,2	4417,1	4654,7	6931,9	5399,9	7999,6	6931,9	5399,9
CSX (MPa)	12,587	18,679	14,453	21,279	16,396	23,452	24,121	15,904	13,316	19,758	15,783	23,5	19,758	15,783
TSX (MPa)	5,681	7,44	5,422	7,378	2,289	1,311	3,184	1,143	2,464	3,145	1,157	1,402	2,464	3,145
ENTHRU (kJ)	13,6	28,5	21,4	44,9	29,6	62,4	29,4	62,1	15,4	32,4	27,1	57,1	15,4	32,4
Res. Ativ. (kN)	1327	1327	1920	2479	2479	2479	2479	2422	1332	1332	2160	2160	1332	2160
Eficiência (%)	21	45	23	25	25	52	25	52	24	51	26	55	24	51

Diâmetro = 65 cm

W = 2% Ru

H=4D

t=L/4D

Estaca	P2A		P19B		P24I	
L (m)	14,8		14,8		14,8	
D (cm)	65		65		65	
L/D	22,8		22,8		22,8	
Ru (kN)	3388,6		2342		2301,2	
W (kN)	67,8		46,8		46,0	
H (m)	2,6		2,6		2,6	
t (cm)	5,7		5,7		5,7	
k (kN/mm)	1536		1536		1536	
$\eta$ (%)	30	65	30	65	30	65
SET (mm)	4,72	9,68	2,78	7,04	2,07	5,04
Golpe/m	211,9	103,3	360,3	142,1	483,4	198,3
FMX (kN)	5633,4	8307,8	5544,5	8185,3	5768,7	8524,3
CSX (MPa)	19,062	28,095	15,568	22,973	14,651	21,617
TSX (MPa)	2,71	2,906	6,763	9,717	4,35	5,524
ENTHRU (kJ)	45,8	98	29,5	62	28	58,7
Res. Ativ. (kN)	3389	3389	2342	2342	2301	2301
Eficiência (%)	26	56	24	51	23	49

Diâmetro = 70 cm

W = 2% Ru

H=4D

t=L/4D

Estaca	E108	
L (m)	12,4	
D (cm)	70	
L/D	17,7	
Ru (kN)	1650,2	
W (kN)	33,0	
H (m)	2,8	
t (cm)	4,4	
k (kN/mm)	2290	
$\eta$ (%)	30	65
SET (mm)	3,27	5,9
Golpe/m	305,4	169,6
FMX (kN)	5888,9	8722,8
CSX (MPa)	14,286	21,031
TSX (MPa)	5,358	7,116
ENTHRU (kJ)	21,7	45,5
Res. Ativ. (kN)	1650	1650
Eficiência (%)	23	49

Diâmetro = 80 cm

$W = 2\% R_u$

$H=4D$

$t=L/4D$

Estaca	P21QA		P23JA	
L (m)	23,0		22,5	
D (cm)	80		80	
L/D	28,8		28,1	
$R_u$ (kN)	4024,9		4292,7	
W (kN)	80,5		85,9	
H (m)	3,2		3,2	
t (cm)	7,2		7,0	
k (kN/mm)	1843		1884	
$\eta$ (%)	30	65	30	65
SET (mm)	1,07	5,42	3,99	8,79
Golpe/m	934,9	184,5	250,8	113,8
FMX (kN)	9351,1	13774,8	9620,5	14176,1
CSX (MPa)	17,291	25,42	17,942	26,394
TSX (MPa)	8,25	11,462	7,71	10,66
ENTHRU (kJ)	60,1	126,1	65	136,4
Res. Ativ. (kN)	3607	4025	4293	4293
Eficiência (%)	23	49	24	50

Diâmetro = 140 cm

$W = 2\% R_u$

$H=4D$

$t=L/4D$

Estaca	P71		P72	
L (m)	12,8		10,0	
D (cm)	140		140	
L/D	9,1		7,1	
$R_u$ (kN)	5685,2		2731,3	
W (kN)	113,7		54,6	
H (m)	5,6		5,6	
t (cm)	2,3		1,8	
k (kN/mm)	17750		22720	
$\eta$ (%)	30	65	30	65
SET (mm)	5,14	9,96	2,42	5,43
Golpe/m	194,7	100,4	412,9	184,2
FMX (kN)	39757,8	58834,6	32864	48787,4
CSX (MPa)	22,499	33,397	18,598	27,829
TSX (MPa)	12,115	17,827	11,846	16,895
ENTHRU (kJ)	149,1	315,4	67,6	143,9
Res. Ativ. (kN)	5685	5685	2731	2731
Eficiência (%)	23	50	22	47

## **APÊNDICE E**

### **VALIDAÇÃO PARA O BANCO DE DADOS**

**$W = 2 \%$ ,  $H = 4D$  e  $k = 500\text{kN/mm}$**

Diâmetro = 30 cm

$W = 2\% R_u$

$H=4D$

Estaca	E9A		E1983	
L (m)	11,5		10,1	
D (cm)	30		30	
L/D	38,3		33,7	
$R_u$ (kN)	1950,7		518,5	
W (kN)	39,0		10,4	
H (m)	1,2		1,2	
t (cm)	3,7		3,7	
k (kN/mm)	500		500	
$\eta$ (%)	30	65	30	65
SET (mm)	-0,45	3,55	2,95	7,31
Golpe/m	9999	281,6	338,6	136,8
FMX (kN)	1686,9	2332,7	868,3	1292,8
CSX (MPa)	24,089	33,508	12,711	18,816
TSX (MPa)	1,16	1,317	2,781	6,089
ENTHRU (kJ)	11,2	25	3,3	7
Res. Ativ. (kN)	1871	1951	475	518
Eficiência (%)	24	53	27	56







Diâmetro = 60 cm															
W = 2% Ru															
H=4D															
Estaca	E0647	E0674	E1693	E009	E084	E03	E18								
L (m)	17,4	18,7	21,3	16,0	17,1	8,0	7,5								
D (cm)	60	60	60	60	60	60	60								
L/D	29,0	31,2	35,5	26,7	28,5	13,3	12,5								
Ru (kN)	1327,4	1920	2969,8	2478,9	2482,1	1332,5	2160,5								
W (kN)	26,5	38,4	59,4	49,6	49,6	26,7	43,2								
H (m)	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4								
t (cm)	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9								
k (kN/mm)	500	500	500	500	500	500	500								
n (%)	30	30	30	30	30	30	30								
SET (mm)	1,83	4,16	6,03	3,91	1,63	2,4	2,32								
Golpe/m	546,5	240,1	166	255,9	612,3	417,5	430,6								
FMX (kN)	2983,8	4401,4	5735,9	3771,9	5534,6	3060	3810,5								
CSX (MPa)	10,166	14,989	21,072	13,603	19,905	8,854	13,052								
TSX (MPa)	4,155	5,585	1,91	1,208	1,152	0,374	0,431								
ENTHRU (kJ)	11,4	24	67,2	24,6	24,5	10,9	18,4								
Res. Ativ. (kN)	1327	1920	2970	2479	2407	1332	2160								
Eficiência (%)	18	20	47	21	21	17	18								

Diâmetro = 65 cm

W = 2% Ru

H=4D

Estaca	P2A		P19B		P24I	
L (m)	14,8		14,8		14,8	
D (cm)	65		65		65	
L/D	22,8		22,8		22,8	
Ru (kN)	3388,6		2342		2301,2	
W (kN)	67,8		46,8		46,0	
H (m)	2,6		2,6		2,6	
t (cm)	17,5		17,5		17,5	
k (kN/mm)	500		500		500	
$\eta$ (%)	30	65	30	65	30	65
SET (mm)	4,07	9,16	2,9	7,14	2	5,13
Golpe/m	245,8	109,1	345,3	140	501	194,9
FMX (kN)	4683	6339,5	4043,7	5961,5	4133,7	6097,3
CSX (MPa)	15,64	22,809	11,446	16,901	10,533	15,558
TSX (MPa)	0,725	2,483	4,18	6,421	1,967	3,011
ENTHRU (kJ)	33,8	73,4	22,7	47,6	21,1	44,3
Res. Ativ. (kN)	3389	3389	2342	2342	2301	2301
Eficiência (%)	19	42	19	39	18	37

Diâmetro = 70 cm

W = 2% Ru

H=4D

Estaca	E108	
L (m)	12,4	
D (cm)	70	
L/D	17,7	
Ru (kN)	1650,2	
W (kN)	33,0	
H (m)	2,8	
t (cm)	20,3	
k (kN/mm)	500	
$\eta$ (%)	30	65
SET (mm)	3,14	6,02
Golpe/m	318	166,1
FMX (kN)	3718,5	5475,3
CSX (MPa)	9,286	13,592
TSX (MPa)	2,175	3,334
ENTHRU (kJ)	15,3	32,5
Res. Ativ. (kN)	1650	1650
Eficiência (%)	17	35

Diâmetro = 80 cm

W = 2% Ru

H=4D

Estaca	P21QA		P23JA	
L (m)	23,0		22,5	
D (cm)	80		80	
L/D	28,8		28,1	
Ru (kN)	4024,9		4292,7	
W (kN)	80,5		85,9	
H (m)	3,2		3,2	
t (cm)	26,5		26,5	
k (kN/mm)	500		500	
η (%)	30	65	30	65
SET (mm)	1,14	8,85	3,82	9
Golpe/m	880,6	170,9	261,5	111,1
FMX (kN)	6226,1	9149,3	6414,2	9425,7
CSX (MPa)	11,665	17,08	12,214	17,843
TSX (MPa)	4,786	6,705	4,394	6,301
ENTHRU (kJ)	44,3	94,1	47,3	100,5
Res. Ativ. (kN)	3622	4025	4293	4293
Eficiência (%)	17	37	17	37

Diâmetro = 140 cm

W = 2% Ru

H=4D

Estaca	P71		P72	
L (m)	12,8		10,0	
D (cm)	140		140	
L/D	9,1		7,1	
Ru (kN)	5685,2		2731,3	
W (kN)	113,7		54,6	
H (m)	5,6		5,6	
t (cm)	81,1		81,1	
k (kN/mm)	500		500	
η (%)	30	65	30	65
SET (mm)	4,09	8,92	1,94	5,26
Golpe/m	244,3	112,1	515,2	190,2
FMX (kN)	11293,7	1664,1	7818,6	11497,2
CSX (MPa)	6,532	9,632	4,528	6,651
TSX (MPa)	1,163	1,948	0,255	0,348
ENTHRU (kJ)	58,2	123,4	21,1	45
Res. Ativ. (kN)	5685	5685	2731	2731
Eficiência (%)	9	19	7	15

## **APÊNDICE F**

### **VALIDAÇÃO PARA O BANCO DE DADOS**

**W variável, H = 2D a 5D e t variável**

Diâmetro = 30 cm

W = 1,8% Ru

H=6D

t=0,13D

W = 3,3% Ru

H=4D

t=0,17D

Estaca	E9A		E1983	
L (m)	11,5		10,1	
D (cm)	30		30	
L/D	38,3		33,7	
Ru (kN)	1950,7		518,5	
W (kN)	35,1		18,1	
H (m)	1,8		1,2	
t (cm)	5,0		5,7	
k (kN/mm)	374		326	
$\eta$ (%)	30	65	30	65
SET (mm)	0,30	5,62	6,60	13,79
Golpe/m	3301,8	177,9	151,5	72,5
FMX (kN)	1862,6	2599,4	959,5	1402,7
CSX (MPa)	26,593	37,437	14,047	20,394
TSX (MPa)	1,424	1,381	1,639	1,768
ENTHRU (kJ)	14,4	32,3	5,8	12,3
Res. Ativ. (kN)	1951	1951	518	518
Eficiência (%)	23	51	27	56







Diâmetro = 60 cm															
	W = 2,1% Ru		W = 1,8% Ru		W = 1,5% Ru		W = 1,5% Ru		W = 1,5% Ru		W = 2,1% Ru		W = 1,7% Ru		
	H=3,5D		H=2D		H=3,5D		H=5,5D		H=6,5D		H=2D		H=3D		
	t=0,25L/D		t=0,25L/D		t=0,15L/D		t=0,15L/D		t=0,25L/D		t=0,9L/D		t=0,9L/D		
Estaca	E0647		E0674		E1693		E009		E084		E03		E18		
L (m)	17,4		18,7		21,3		16,0		17,1		8,0		7,5		
D (cm)	60		60		60		60		60		60		60		
L/D	29,0		31,2		35,5		26,7		28,5		13,3		12,5		
Ru (kN)	1327,4		1920		2969,8		2478,9		2482,1		1332,5		2160,5		
W (kN)	27,9		34,6		44,5		37,2		37,2		28,0		36,7		
H (m)	2,1		1,2		3,3		2,1		3,9		1,2		1,8		
t (cm)	7,3		7,8		5,3		6,7		7,1		12,0		11,3		
k (kN/mm)	1028		956		1399		1118		1046		621		662		
η (%)	30	65	30	65	30	65	30	65	30	65	30	65	30	65	
SET (mm)	1,76	3,96	1,65	4,15	2,32	5,38	2,13	5,29	2,02	5,22	1,15	2,82	1,15	3,27	
Golpe/m	567	253,3	605,9	241	430,3	185,9	469,9	188,9	494,3	191,6	868,7	354,9	866,8	305,5	
FMX (kN)	3567,8	5288	2770,4	4106,4	5489,2	8105,6	3947,4	5637,9	5232,4	7736,1	2353,8	3490,4	3324,3	4940,4	
CSX (MPa)	12,002	17,782	9,824	14,541	19,389	28,546	14,245	21	19,037	28,003	6,79	10,109	9,742	14,521	
TSX (MPa)	5,368	7,055	4,261	5,737	2,225	2,603	4,661	6,781	5,012	6,489	0,19	0,347	0,421	0,694	
ENTHRU (kJ)	12,7	26,6	9,7	20,4	36,6	77,1	18,3	38,7	33	69,8	6,4	13,2	12,7	26,4	
Res. Ativ. (kN)	1327	1327	1920	1920	2970	2970	2479	2479	2482	2482	1332	1332	2160	2160	
Eficiência (%)	22	45	23	49	25	52	23	50	23	48	19	39	19	40	

Diâmetro = 65 cm

	W = 1,4% Ru H=3D t=0,45L/D		W = 1,7% Ru H=3D t=0,45L/D		W = 1,7% Ru H=3D t=0,45L/D	
Estaca	P2A		P19B		P24I	
L (m)	14,8		14,8		14,8	
D (cm)	65		65		65	
L/D	22,8		22,8		22,8	
Ru (kN)	3388,6		2342		2301,2	
W (kN)	47,4		39,8		39,1	
H (m)	1,95		1,95		1,95	
t (cm)	10,2		10,2		10,2	
k (kN/mm)	854		854		854	
η (%)	30	65	30	65	30	65
SET (mm)	1,79	4,75	1,15	4,16	0,7	2,89
Golpe/m	558,9	210,6	868,7	240,7	1425	345,8
FMX (kN)	3988,9	5895,2	3895,2	5752,6	4005,3	5917,5
CSX (MPa)	13,403	19,749	10,984	16,225	10,183	15,037
TSX (MPa)	0,867	2,051	6,373	9,111	4,096	5,527
ENTHRU (kJ)	19,7	42,3	16,3	34,1	15,2	31,8
Res. Ativ. (kN)	3389	3389	2342	2342	2301	2301
Eficiência (%)	21	46	21	44	20	42

Diâmetro = 70 cm

	W = 1,9% Ru H=2D t=0,65L/D	
Estaca	E108	
L (m)	12,4	
D (cm)	70	
L/D	17,7	
Ru (kN)	1650,2	
W (kN)	31,4	
H (m)	1,4	
t (cm)	11,5	
k (kN/mm)	881	
η (%)	30	65
SET (mm)	1,32	3,14
Golpe/m	755,4	318,8
FMX (kN)	2954,3	4390,4
CSX (MPa)	7,266	10,765
TSX (MPa)	2,302	3,428
ENTHRU (kJ)	8,1	17,2
Res. Ativ. (kN)	1650	1650
Eficiência (%)	18	39

Diâmetro = 80 cm

	W = 1,3% Ru H=3D t=0,25L/D		W = 1,3% Ru H=5D t=0,25L/D	
Estaca	P21QA		P23JA	
L (m)	23,0		22,5	
D (cm)	80		80	
L/D	28,8		28,1	
Ru (kN)	4024,9		4292,7	
W (kN)	52,3		55,8	
H (m)	3,2		4,0	
t (cm)	7,2		7,0	
k (kN/mm)	1843		1884	
η (%)	30	65	30	65
SET (mm)	-0,46	3,19	2,1	5,7
Golpe/m	9999	313,9	475,5	175,4
FMX (kN)	9679,9	14293	9403,6	13871,9
CSX (MPa)	17,967	26,426	17,637	25,997
TSX (MPa)	10,393	14,183	10,395	13,888
ENTHRU (kJ)	49,5	104,9	47,8	101
Res. Ativ. (kN)	3263	4025	3973	4293
Eficiência (%)	30	63	21	45

Diâmetro = 140 cm

	W = 1,3% Ru H=3D t=1,3D		W = 1,6% Ru H=3,5D t=1,2D	
Estaca	P71		P72	
L (m)	12,8		10,0	
D (cm)	140		140	
L/D	9,1		7,1	
Ru (kN)	5685,2		2731,3	
W (kN)	73,9		43,7	
H (m)	4,2		4,9	
t (cm)	11,9		8,6	
k (kN/mm)	3414		4733	
η (%)	30	65	30	65
SET (mm)	1,12	3,9	0,86	3,07
Golpe/m	894,6	256,2	1159,9	325,8
FMX (kN)	17973	26631,4	17432,2	26011,5
CSX (MPa)	10,293	15,203	9,865	14,72
TSX (MPa)	6,623	9,875	7,478	10,86
ENTHRU (kJ)	46,5	99,1	30,4	64,8
Res. Ativ. (kN)	5685	5685	2731	2731
Eficiência (%)	15	32	14	30

## **APÊNDICE G**

### **VALIDAÇÃO PARA O BANCO DE DADOS**

**W variável,  $H = 2D$  a  $5D$  e  $k = 500\text{kN/mm}$**

Diâmetro = 30 cm

W = 1,8% Ru  
H=6D

W = 3,3% Ru  
H=4D

Estaca	E9A		E1983	
L (m)	11,5		10,1	
D (cm)	30		30	
L/D	38,3		33,7	
Ru (kN)	1950,7		518,5	
W (kN)	35,1		18,1	
H (m)	1,8		1,2	
t (cm)	3,7		3,7	
k (kN/mm)	500		500	
$\eta$ (%)	30	65	30	65
SET (mm)	0,57	6,00	6,72	14,39
Golpe/m	1749,7	166,7	148,8	69,5
FMX (kN)	1900,2	2639,0	1013,0	1491,6
CSX (MPa)	27,370	38,299	14,837	21,702
TSX (MPa)	1,522	1,421	1,542	2,771
ENTHRU (kJ)	15,5	34,4	6,1	13,0
Res. Ativ. (kN)	1951	1951	518	518
Eficiência (%)	25	54	28	60



[illegible]



Diâmetro = 60 cm												
	W = 2,1% Ru	W = 1,8% Ru	W = 1,5% Ru	W = 1,5% Ru	W = 1,5% Ru	W = 1,5% Ru	W = 1,5% Ru	W = 1,5% Ru	W = 2,1% Ru	W = 1,7% Ru		
	H=3,5D	H=1,5D	H=5,5D	H=3,5D	H=5,5D	H=3,5D	H=7D	H=2D	H=3D			
Estaca	E0647	E0674	E1693	E009	E084	E03				E18		
L (m)	17,4	18,7	21,3	16,0	17,1	8,0				7,5		
D (cm)	60	60	60	60	60	60				60		
L/D	29,0	31,2	35,5	26,7	28,5	13,3				12,5		
Ru (kN)	1327,4	1920	2969,8	2478,9	2482,1	1332,5				2160,5		
W (kN)	27,9	34,6	44,5	37,2	37,2	28,0				36,7		
H (m)	2,1	0,9	3,3	2,1	4,2	1,2				1,8		
t (cm)	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9				14,9		
k (kN/mm)	500	500	500	500	500	500				500		
η (%)	30	65	30	65	30	65	30	65	30	65		
SET (mm)	1,71	3,98	0,82	2,94	2,22	5,39	2,11	5,55	1,12	2,81	1,04	3,14
Golpe/m	584	251,4	1226,4	340,2	450,2	185,5	473,5	180,1	889,3	355,5	963,3	318,6
FMX (kN)	2845,8	4198,5	1982,6	2927,8	4154,2	6113,9	4438,9	6548,3	2194,9	3251,1	3063,4	4549
CSX (MPa)	9,695	14,314	7,108	10,472	15,168	22,169	16,795	23,707	6,325	9,396	8,814	13,161
TSX (MPa)	3,912	5,258	3,094	3,866	1,947	1,73	3,527	4,378	0,24	0,458	0,44	0,599
ENTHRU (kJ)	10,7	22,5	6,4	13,5	30,6	64,5	29,8	63,4	6	12,5	11,6	24,2
Res. Ativ. (kN)	1327	1327	1920	1920	2970	2479	2482	2482	1332	2160	2160	2160
Eficiência (%)	18	38	21	43	21	44	19	41	18	37	18	37

Diâmetro = 65 cm

W = 1,4% Ru  
H=3,5D

W = 1,7% Ru  
H=2,5D

W = 1,7% Ru  
H=3D

Estaca	P2A		P19B		P24I	
L (m)	14,8		14,8		14,8	
D (cm)	65		65		65	
L/D	22,8		22,8		22,8	
Ru (kN)	3388,6		2342		2301,2	
W (kN)	47,4		39,8		39,1	
H (m)	2,28		1,63		1,95	
t (cm)	17,5		17,5		17,5	
k (kN/mm)	500		500		500	
$\eta$ (%)	30	65	30	65	30	65
SET (mm)	1,77	5,02	0,46	3,17	0,57	2,78
Golpe/m	564,3	199,2	2196,2	315,2	1767,4	359,2
FMX (kN)	3772,6	5547,8	3003,3	4430,9	3353,1	4946,2
CSX (MPa)	12,649	18,55	8,491	12,535	8,542	12,602
TSX (MPa)	0,68	1,592	3,99	5,92	2,533	3,595
ENTHRU (kJ)	19,3	41,7	11,9	24,9	13,1	27,4
Res. Ativ. (kN)	3389	3389	2342	2342	2301	2301
Eficiência (%)	18	39	18	38	17	36

Diâmetro = 70 cm

W = 1,9% Ru  
H=2D

Estaca	E108	
L (m)	12,4	
D (cm)	70	
L/D	17,7	
Ru (kN)	1650,2	
W (kN)	31,4	
H (m)	1,4	
t (cm)	20,3	
k (kN/mm)	500	
$\eta$ (%)	30	65
SET (mm)	1,56	3,55
Golpe/m	639,4	281,7
FMX (kN)	2749,8	4055,4
CSX (MPa)	6,913	10,114
TSX (MPa)	1,647	2,627
ENTHRU (kJ)	8,4	17,6
Res. Ativ. (kN)	1650	1650
Eficiência (%)	19	40

Diâmetro = 80 cm

W = 1,3% Ru  
H=5,5D

W = 1,3% Ru  
H=5D

Estaca	P21QA		P23JA	
L (m)	23,0		22,5	
D (cm)	80		80	
L/D	28,8		28,1	
Ru (kN)	4024,9		4292,7	
W (kN)	52,3		55,8	
H (m)	4,4		4,0	
t (cm)	26,5		26,5	
k (kN/mm)	500		500	
η (%)	30	65	30	65
SET (mm)	-0,56	3,31	1,85	5,74
Golpe/m	9999	301,7	540,4	174,3
FMX (kN)	6129,1	9018,2	6016,3	8853,2
CSX (MPa)	11,49	16,842	11,469	16,783
TSX (MPa)	5,528	7,604	5,522	7,5
ENTHRU (kJ)	34,6	74,1	33,8	72,4
Res. Ativ. (kN)	3240	4025	3926	4293
Eficiência (%)	15	32	15	32

Diâmetro = 140 cm

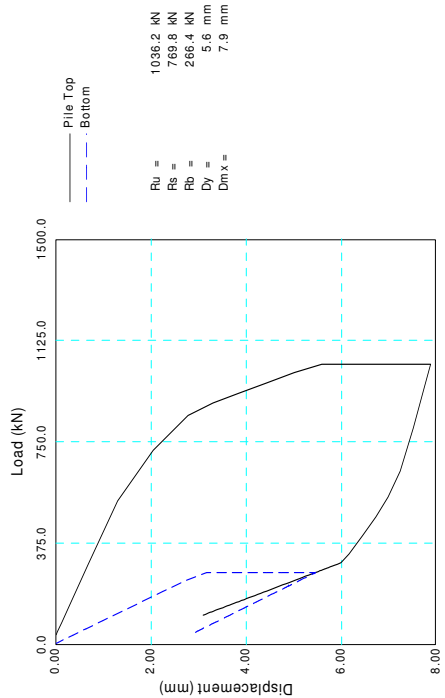
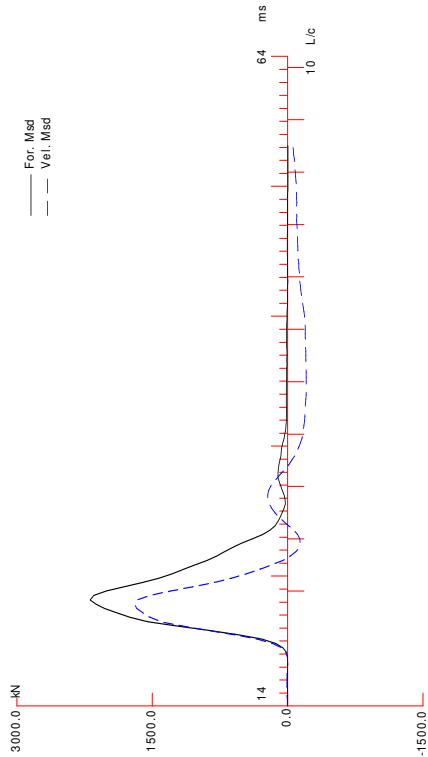
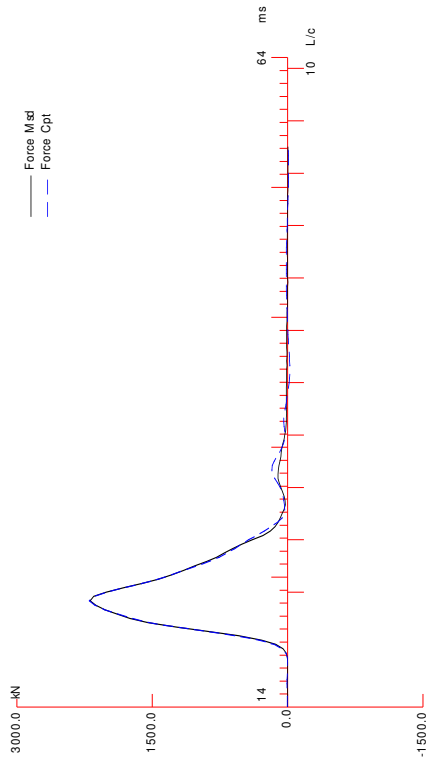
W = 1,3% Ru  
H=3D

W = 1,6% Ru  
H=3,5D

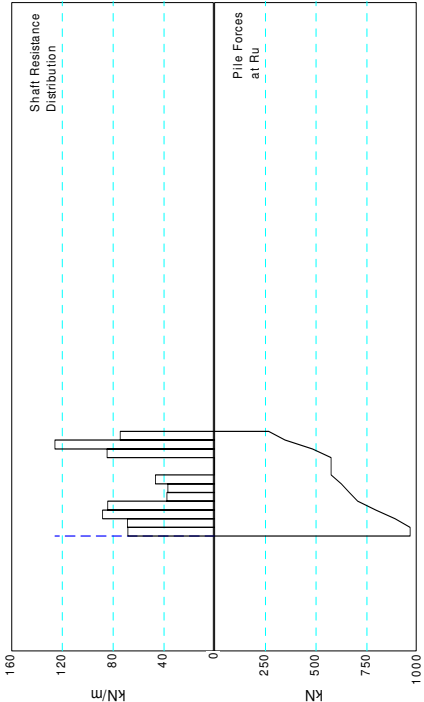
Estaca	P71		P72	
L (m)	12,8		10,0	
D (cm)	140		140	
L/D	9,1		7,1	
Ru (kN)	5685,2		2731,3	
W (kN)	73,9		43,7	
H (m)	4,2		6,3	
t (cm)	81,1		81,1	
k (kN/mm)	500		500	
η (%)	30	65	30	65
SET (mm)	0,61	2,77	1,08	3,74
Golpe/m	1631,9	360,4	922,3	267,5
FMX (kN)	7897,6	11616	7402,5	10896
CSX (MPa)	4,671	6,869	4,328	6,357
TSX (MPa)	0,761	0,945	1,232	1,717
ENTHRU (kJ)	22,5	47,6	16,5	35,2
Res. Ativ. (kN)	5685	5685	2731	2731
Eficiência (%)	7	15	6	13

## **ANEXO**

### **EXEMPLO DE ANÁLISE CAPWAP®**



Ru = 1036.2 kN  
Rs = 769.8 kN  
Rb = 266.4 kN  
Dy = 5.6 mm  
Dmx = 7.9 mm



RGT-01; Pile: E08  
 DIAM 40; Blow: 9  
 IN SITU GEOTECNIA S/C

Test: 26-Apr-2005  
 CAPWAP® Ver. 2000-1  
 OP: CA

## CAPWAP FINAL RESULTS

Total CAPWAP Capacity:			1036.2; along Shaft		769.8; at Toe		266.4 kN		
Soil Sgmnt No.	Dist. Below Gages m	Depth Below Grade m	Ru kN	Force in Pile kN	Sum of Ru kN	Unit Resist. (Depth) kN/m	Unit Resist. (Area) kPa	Smith Damping Factor s/m	Quake mm
1036.2									
1	1.1	0.9	73.6	962.6	73.6	68.49	48.58	1.318	1.000
2	2.1	1.9	73.8	888.8	147.5	68.68	48.71	1.318	1.000
3	3.2	3.0	94.9	793.8	242.4	88.29	62.62	1.318	1.000
4	4.3	4.1	90.6	703.2	333.0	84.29	59.78	1.318	1.000
5	5.4	5.2	40.5	662.8	373.4	37.64	26.69	1.318	1.000
6	6.5	6.2	39.7	623.1	413.1	36.90	26.17	1.318	1.000
7	7.5	7.3	50.3	572.9	463.4	46.75	33.15	1.318	1.000
8	8.6	8.4	0.0	572.9	463.4	0.00	0.00	0.000	1.000
9	9.7	9.5	0.0	572.9	463.4	0.00	0.00	0.000	1.000
10	10.8	10.6	91.0	481.8	554.4	84.66	60.05	1.318	1.000
11	11.8	11.6	135.3	346.6	689.6	125.83	89.24	1.318	1.000
12	12.9	12.7	80.1	266.4	769.8	74.53	52.86	1.318	1.000
Avg. Skin			64.1		60.61		42.32	1.318	1.000
Toe			266.4				1675.76	0.668	3.120
Soil Model Parameters/Extensions						Skin	Toe		
Case Damping Factor						0.889	0.156	Smith Type	
Unloading Quake		(% of loading quake)				30	97		
Reloading Level		(% of Ru)				100	100		
Unloading Level		(% of Ru)				1			
Resistance Gap (included in Toe Quake) (mm)							0.020		
Soil Plug Weight		(kN)					1.30		
Soil Support Dashpot						0.400	0.000		
Soil Support Weight		(kN)				7.60	0.00		

CAPWAP match quality: 1.68 (Wave Up Match)  
 Observed: final set = 3.000 mm; blow count = 333 b/m  
 Computed: final set = 2.717 mm; blow count = 368 b/m

RGT-01; File: E08  
 DIAM 40; Blow: 9  
 IN SITU GEOTECNIA S/C

Test: 26-Apr-2005  
 CAPWAP® Ver. 2000-1  
 OP: CA

## EXTREMA TABLE

Pile Sgmt No.	Dist. Below Gages m	max. Force kN	min. Force kN	max. Comp. Stress MPa	max. Tens. Stress MPa	max. Trnsfd. Energy kJ	max. Veloc. m/s	max. Displ. mm
1	1.1	2278.5	-26.1	14.330	-0.164	9.45	1.4	5.757
2	2.1	2163.9	-18.7	13.610	-0.118	8.63	1.3	5.700
3	3.2	2037.0	-53.6	12.811	-0.337	7.89	1.3	5.651
4	4.3	1862.6	-98.1	11.714	-0.617	7.02	1.2	5.617
5	5.4	1691.9	-149.6	10.641	-0.941	6.19	1.2	5.597
6	6.5	1620.8	-131.7	10.194	-0.828	5.78	1.2	5.602
7	7.5	1544.2	-88.2	9.712	-0.555	5.36	1.2	5.619
8	8.6	1385.2	-54.2	8.712	-0.341	4.84	1.2	5.631
9	9.7	1278.6	-11.2	8.042	-0.070	4.82	1.4	5.615
10	10.8	1138.1	-11.0	7.158	-0.069	4.82	1.4	5.575
11	11.8	925.4	-8.6	5.820	-0.054	3.86	1.4	5.525
12	12.9	655.8	-3.9	4.124	-0.025	1.74	1.4	5.454
Absolute	1.1			14.330			(T =	22.8 ms)
	5.4				-0.941		(T =	29.6 ms)

## CASE METHOD

J =	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
RS1	414.9	429.6	444.2	458.9	473.5	488.2	502.8	517.5	532.1	546.8
RMX	1856.0	1652.1	1448.2	1244.4	1040.5	836.7	632.8	428.9	243.2	226.7
RSU	1968.9	1785.7	1602.5	1419.3	1236.1	1052.9	869.7	686.5	503.3	320.1

RAU= 176.4 (kN); RA2= 820.1 (kN)

Current CAPWAP Ru= 1036.2 (kN); Corresponding J(Rs)= 0.00; J(Rx)=0.40

VMX	VFN	VT1*Z	FT1	FMX	DMX	DFN	EMX	RLT
m/s	m/s	kN	kN	kN	mm	mm	kJ	kN
1.50	0.00	152.4	116.0	2215.0	5.807	2.997	9.6	2174.5

RGT-01; Pile: E08  
 DIAM 40; Blow: 9  
 IN SITU GEOTECNIA S/C

Test: 26-Apr-2005  
 CAPWAP® Ver. 2000-1  
 OP: CA

PILE PROFILE AND PILE MODEL

Depth m	Area cm <sup>2</sup>	E-Modulus MPa	Spec. Weight kN/m <sup>3</sup>	Circumf. m
0.00	1590.00	22972.2	22.000	1.410
12.90	1590.00	22972.2	22.000	1.410

Toe Area                      0.159              m<sup>2</sup>

Top Segment Length        1.08 m, Top Impedance   1141.40 kN/m/s

Pile Damping        2.0 %, Time Incr   0.336 ms, Wave Speed    3200.0 m/s